UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Comparación del método de análisis estructural (AFLE Y BIM+FEA) en la estimación de derivas entrepiso de un edificio de concreto armado de 10 pisos en Lima

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor(es):

Eleonor Saray Fernández Saavedra

Asesor:

Mg. Armin Quintana Sanchez

Lima,09 noviembre del 2026

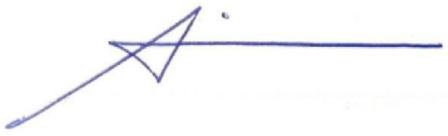
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo *Armin Quintana Sanchez*, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **"Comparación del método de análisis estructural (AFLE Y BIM+FEA) en la estimación de derivas entrepiso de un edificio de concreto armado de 10 pisos en lima"** del autor; Eleonor Saray Fernández Saavedra tiene un índice de similitud de 10 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima a los 9 días del mes de noviembre del año 2026



MG. ARMIN QUINTANA SÁNCHEZ
INGENIERO CIVIL
CIP Nº 98527

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a 05 día(s) del mes de noviembre del año 2026 siendo las 09:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a): Ing. David Díaz Garamendi, el (la) secretario(a): Mtra. Fiorella Maira Zapata Antesana y los demás miembros: Dr. Rolando Quispe Basualdo y el (la) asesor(a) Mg. Armin Quintana Sánchez con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: "Comparación del método de análisis estructural AFLE y BIM+FEA en la estimación de derivas entrepiso de un edificio de concreto armado de 10 pisos en lima" del(los) bachiller/es: a) Fernandez Saavedra, Eleonor Saray b) c) conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil (Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Fernandez Saavedra, Eleonor Saray

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	Bt	Muy bueno	Sobresaliente

Bachiller (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Bachiller (a)

Bachiller (b)

Bachiller (c)

Agradezco a mis padres Nancy Saavedra H.
y Teófilo Fernández C.
por apoyarme en cada etapa de mi vida, y
le dedico esta tesis a mi hija Sophia Rose.

INDICE

Resumen ……4
Introducción……5
Metodología……7
Análisis de resultados……19
Comparación de resultados……...36
Discusiones……..36
Conclusiones……38
Referencias Bibliográficas……40

COMPARACION DEL METODO DE ANALISIS ESTRUCTURAL (AFLE Y BIM+FEA) EN LA ESTIMACION DE DERIVAS ENTREPISO DE UN EDIFICIO DE CONCRETO ARMADO DE 10 PISOS EN LIMA

COMPARISON OF THE STRUCTURAL ANALYSIS METHOD (AFLE AND BIM+FEA) IN THE ESTIMATION OF FLOOR DRIFTS OF A 10-STORY REINFORCED CONCRETE BUILDING IN LIMA

Eleonor-Fernández Saavedra

[1] *Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú*

RESUMEN

El objetivo general de este estudio es comparar las derivas entrepisos calculadas utilizando un flujo de trabajo convencional de modelado y análisis estructural de ETABS con un enfoque BIM+FEA integrado Revit – Robot, aplicado a un edificio de concreto armado de 10 pisos en Lima diseñado según la Norma Peruana E030. La metodología se basó en la elaboración de un modelo BIM detallado del sistema pórtico en X y dual en Y, a partir del cual se generaron dos modelos equivalentes en geometría, distribución de masas, rigidez, diafragmas y parámetros sísmicos, estos modelos se diferencian por el flujo de modelado: uno desarrollado directamente en ETABS y otro mediante flujo integrado Revit – Robot. El caso principal del estudio corresponde al edificio de 10 niveles, evaluado mediante AFLE en ETABS y el flujo BIM+FEA Revit–Robot. De manera adicional, se incorporaron configuraciones equivalentes de 6 y 12 niveles con la misma distribución estructural en planta como verificación complementaria de la sensibilidad a la altura; asimismo, se realizó un análisis dinámico modal–espectral como contraste de los resultados, conforme a la aplicabilidad de la Norma E.030. En ambos modelos se evaluaron el peso sísmico por nivel, los períodos fundamentales, la cortante basal, la distribución de fuerzas laterales y las derivas entrepiso; sobre las series de derivas por piso se aplicaron pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk) y pruebas de hipótesis para muestras relacionadas (t de Student o Wilcoxon) con el fin de determinar la significancia estadística de las diferencias. Los resultados muestran discrepancias pequeñas en el peso sísmico total y en la cortante basal, pero diferencias crecientes en los períodos fundamentales y en algunas solicitaciones estructurales conforme aumenta la altura, mientras que las derivas entrepiso presentaron errores absolutos medios reducidos, aunque con diferencias estadísticamente significativas en determinadas configuraciones y direcciones de análisis. Se concluye que ambos flujos muestran una correspondencia general en sus respuestas estructurales, con diferencias cuantitativas observadas en base al peso sísmico, períodos fundamentales, corte basal, distribución de la fuerza lateral y deriva entre pisos. Estas diferencias se interpretan en base al enfoque de modelización y solución estructural, manteniendo constantes los principales parámetros de comparación estructural y sísmica.

Palabras Clave: Deriva entrepiso, Fuerzas Laterales equivalentes, BIM+FEA, concreto armado, peso sismico

ABSTRACT

The general objective of this study is to compare inter-story drifts calculated using a conventional ETABS structural modeling and analysis workflow against an integrated Revit–Robot BIM+FEA approach, applied to a 10-story reinforced concrete building in Lima designed according to Peruvian Standard E.030. The methodology involved creating a detailed BIM model of a structural system featuring moment frames in the X-direction and a dual system in the Y-direction; from this, two models equivalent in geometry, mass distribution, stiffness, diaphragms, and seismic parameters were generated, differing only in their modeling workflow: one developed directly in ETABS and the other via the integrated Revit–Robot workflow. The study's primary case is the 10-story building, evaluated using ETABS and the Revit–Robot BIM+FEA workflow. Additionally, equivalent 6- and 12-story configurations—sharing the same structural floor plan layout—were included to verify sensitivity to height; a modal-spectral dynamic analysis was also performed to cross-check results in accordance with Standard E.030. Both models were evaluated for seismic weight per level, fundamental periods, base shear, lateral force distribution, and inter-story drifts. Normality tests (Shapiro–Wilk) and hypothesis tests for related samples (Student's t-test or Wilcoxon test) were applied to the inter-story drift data to determine the statistical significance of any differences. Results show minor discrepancies in total seismic weight and base shear, but increasing differences in fundamental periods and certain structural demands as height increases; meanwhile, inter-story drifts exhibited low mean absolute errors, despite showing statistically significant differences in specific configurations and analysis directions. It is concluded that both workflows show a general correspondence in their structural responses, with quantitative differences observed regarding seismic weight, fundamental periods, base shear, lateral force distribution, and inter-story drift. These differences are interpreted based on the modeling and structural solution approach, while keeping the main structural and seismic comparison parameters constant.

Keywords: interstory drift, Equivalent Lateral Force method, BIM+FEA, reinforced concrete, seismic analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Perú se ubica en el margen de subducción Nazca–Sudamericana, donde la convergencia de placas genera una amenaza sísmica elevada y la posibilidad de eventos de gran magnitud que afectan de manera recurrente a Lima y otras ciudades costeras [2]. En este contexto, el Reglamento Nacional de Edificaciones, a través de la Norma Técnica E.030, establece requisitos mínimos para el diseño sismorresistente, entre ellos límites de deriva entrepiso y de desempeño estructural que buscan salvaguardar la vida y reducir las pérdidas económicas [1]. La deriva entrepiso se ha convertido en un parámetro importante porque muestra cómo se comporta toda la estructura durante un sismo y cómo se afectan tanto los elementos estructurales como los no estructurales, además de cómo se recupera la operación después del evento [3] y [8]. Estudios recientes sobre edificios con muros de concreto armado diseñados según la normativa peruana indican que, aunque cumplen con los requisitos de resistencia, pueden tener una respuesta importante en términos de derivas y ductilidad durante sismos fuertes, especialmente en edificios de mediana altura comunes en el área de Lima [3]. La caracterización del desempeño basada en derivas ha sido incluida en estudios sobre desempeño sísmico y evaluación de pérdidas, combinando modelos tridimensionales con enfoques probabilísticos de riesgo [2], [3] y [7]. En este contexto, tener estimaciones confiables de la deriva entrepiso es clave para evaluar si los límites de servicio y seguridad de la E.030 son adecuados para el tipo de edificios existentes en Perú [1], [3] y [8].

En el entorno profesional, el método de Fuerzas Laterales Equivalentes (AFLE) sigue siendo ampliamente utilizado por su simplicidad, su alineación con la E.030 y su integración con los programas de análisis estructural [1] y [8]. Este método supone que la respuesta está dominada por el primer modo de vibración, y que la estructura tiene distribución regular de masas y rigideces, lo que permite calcular el cortante basal desde el espectro elástico reducido [1] y [8]. Esta lógica permite verificar rápidamente y comparar alternativas, por lo que sigue siendo la opción preferida para el diseño inicial de edificios regulares de concreto armado. Sin embargo, varios estudios han mostrado que, en estructuras con irregularidades geométricas, diafragmas con orificios, variaciones de rigidez entre niveles o sistemas mixtos de pórticos y muros, las suposiciones del AFLE pueden subestimar efectos torsionales y concentraciones de demanda de deriva [2], [3] y [8]. En edificios de muros de concreto armado típicos del Perú, pequeños cambios en rigidez o masa debido a modificaciones de uso, disposición de muros o geometría de losas pueden alterar el perfil de derivas y ubicar los pisos más afectados [3]. Estas limitaciones motivan la exploración de enfoques de análisis que representen de manera más explícita los diafragmas, las rigideces efectivas y la interacción entre elementos portantes. Paralelamente, la metodología BIM se ha establecido como estándar en el desarrollo de proyectos, permitiendo que los equipos de diseño trabajen en un modelo digital único que integra geometría, especificaciones y fases de construcción [4] y [5]. En el ámbito estructural, su uso ha evolucionado desde la generación de planos automatizados hacia flujos de trabajo integrados BIM+FEA, donde el modelo BIM se conecta con softwares de elementos finitos para automatizar la transferencia de secciones, materiales, cargas y condiciones de apoyo, reduciendo errores y mejorando la trazabilidad de cambios [4] y [5].

En los últimos años, investigaciones han explorado el uso de plataformas BIM conectadas a sistemas de análisis para realizar estudios sísmicos avanzados y evaluar daños en marcos de concreto armado, integrando los resultados como derivas, rotaciones y estados límites directamente en el modelo BIM [6]. También se han propuesto marcos metodológicos para estimar pérdidas sísmicas basados en BIM y el enfoque FEMA P-58, donde el modelo BIM se usa como fuente de datos para crear modelos estructurales y de ocupación coherentes [7]. Estos desarrollos muestran el potencial de los flujos BIM+FEA para articular diseño estructural, evaluación de desempeño y estimación de pérdidas dentro del mismo entorno de información [4] y [7]. A pesar de estos avances, en el contexto peruano aún hay poca evidencia que compare de manera sistemática un modelo tradicional basado en AFLE con uno integrado BIM+FEA para edificios de concreto armado de mediana altura diseñados según la E.030. En particular, hay una falta de información sobre cómo la integración BIM+FEA influye en la estimación de derivas entrepisos y cortantes basales

cuando se representa claramente la interacción entre pórticos y muros, los diafragmas rígidos o semirrígidos y las rigideces efectivas de los elementos [3] y [6]. Para reforzar la validez del análisis y evaluar la sensibilidad de las derivas ante la altura, se incluye una verificación adicional manteniendo igual la distribución estructural en planta y variando solamente el número de niveles. El caso principal del estudio corresponde a un edificio de 10 niveles, comparado mediante AFLE en ETABS y el flujo BIM+FEA en Revit-Robot, además se analizan configuraciones equivalentes de 6 y 12 niveles como validación. Para el caso de 12 niveles, y en referencia con las limitaciones del método estático equivalente, se aplicó un análisis dinámico modal – espectral (RSA) como referencia conforme a la norma E.030.

2. ANTECEDENTES

La deriva entrepiso se considera un parámetro clave para relacionar la demanda sísmica con el daño en elementos estructurales y no estructurales, así como con la pérdida de funcionalidad de un edificio. En Perú, diversos estudios muestran que, bajo la norma RNE E.030, la verificación de derivas resulta más sensible que la revisión de esfuerzos para evaluar el desempeño de edificios de concreto armado de mediana altura. Investigaciones sobre estructuras con sistema dual en Cajamarca indican que el agotamiento de los límites de deriva tiende a ser el factor dominante en el diseño ante sismos intermedios y severos, incluso cuando las resistencias de los elementos cumplen con los requisitos normativos [9].

Estudios nacionales sobre edificios de concreto armado que cumplen con la E.030 muestran que la verificación de derivas puede ser más crítica que la revisión de esfuerzos cuando cambian las condiciones de rigidez del sistema estructural. Esto puede ocurrir por modificaciones en la configuración de muros, la rigidez de los entrepisos o la forma de modelar los diafragmas [10]. Evaluaciones recientes del comportamiento sísmico de módulos escolares en la Sierra Norte del país, modelados en ETABS y verificados con los criterios de deriva de la E.030, revelan que configuraciones aparentemente normales pueden exceder los límites admisibles si se consideran adecuadamente las masas tributarias y la interacción suelo–estructura [11]. Estos hallazgos resaltan la importancia de un control explícito de la deriva en edificaciones esenciales y de uso educativo, más allá del cumplimiento del cortante basal. Otras investigaciones nacionales analizan la respuesta sísmica de edificios de concreto armado desde un enfoque general.

Estudios sobre el comportamiento sísmico en Perú destacan que la deriva entrepiso resume de manera efectiva los efectos combinados de rigidez, altura, irregularidades y configuración de muros, proponiendo su uso como variable de síntesis para comparar distintas tipologías estructurales [12]. La altura se considera un factor de sensibilidad relevante por su influencia directa en el período fundamental y en la distribución de la demanda de deriva. Por tanto, es importante comparar las respuestas en configuraciones con diferente número de niveles, manteniendo el mismo esquema estructural. También se ha observado que, en edificios con sótanos profundos, la interacción entre diafragmas rígidos, muros perimetrales y niveles enterrados puede alterar significativamente el perfil de derivas a lo largo de la altura, incluso si el cortante basal cumple con las normas [13]. A nivel internacional, la deriva entrepiso se ha consolidado como un parámetro central en el diseño y la evaluación sísmica basada en desempeño. Estudios recientes han propuesto modelos de aprendizaje profundo que, a partir de grandes inventarios de edificios de concreto armado, permiten estimar el período fundamental y la deriva máxima de entrepiso, identificando los parámetros geométricos y de rigidez que más influyen en la demanda sísmica [14]. Por otro lado, investigaciones sobre marcos de concreto analizados con el método estático equivalente han examinado la relación entre patrones de carga lateral y distribución de derivas, mostrando que la elección del patrón de fuerzas afecta significativamente la localización de los pisos críticos [15] y [16].

En cuanto a enfoques integrados BIM+FEA, la literatura reciente ha avanzado hacia flujos de trabajo que conectan modelos BIM con plataformas de análisis no lineal. Un marco desarrollado en Portugal permite exportar desde Revit, mediante scripts en Dynamo, la geometría, propiedades mecánicas, apoyos y refuerzo de edificios existentes hacia SeismoStruct, automatizando la evaluación sísmica mediante análisis pushover

y mostrando claramente la obtención de derivas, formación de rótulas plásticas y curvas fuerza–desplazamiento [17]. De forma complementaria, se han propuesto flujos BIM abiertos para vincular modelos paramétricos con OpenSees, enfocados en análisis de fragilidad y evaluación probabilista del riesgo, donde nuevamente la deriva entrepiso se utiliza como demanda estructural principal. Sin embargo, estos estudios se enfocan en edificaciones ya existentes o en casos aislados, y no comparan, bajo el mismo rango de diseño y parámetros de masa y rigidez, los resultados obtenidos con un AFLE tradicional y un flujo BIM+FEA en edificios de mediana altura, lo que justifica la presente investigación aplicada al contexto peruano.

3. METODOLOGIA

Esta investigación es un estudio aplicado utilizando un diseño cuantitativo y comparativo para contrastar los resultados de dos enfoques de soluciones estructurales y de modelado: un método convencional desarrollado directamente en ETABS y un flujo de trabajo BIM+FEA integrado usando Revit y Robot. Para garantizar la comparabilidad, ambos modelos mantienen geometría equivalente, condiciones de soporte, propiedades del material, distribución de masas, rigidez, diafragmas y parámetros sísmicos. Los procedimientos de análisis sísmico AFLE y RSA se mantienen como métodos de evaluación y se aplican según sea necesario a las configuraciones estructurales y condiciones especificadas en la Norma E.030.

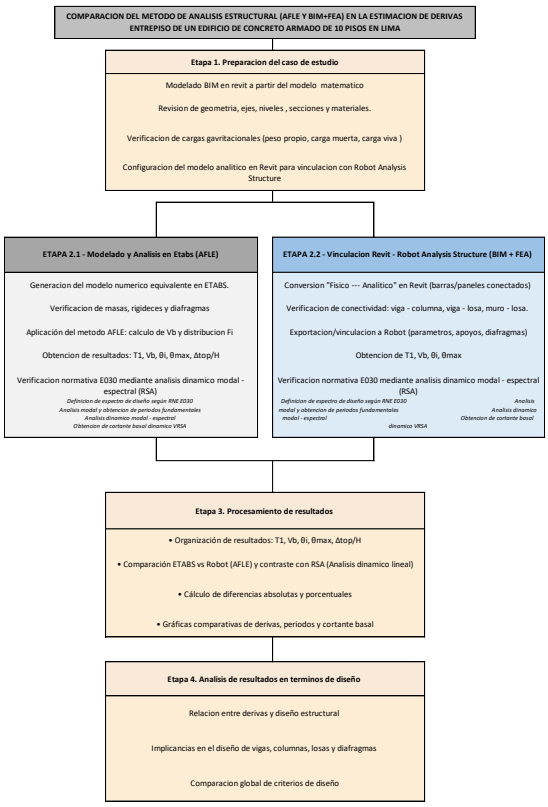


Ilustración 1 Flujograma de Investigación
Fuente: Elaboración propia.

En ambos flujos, los criterios de modelado, las propiedades estructurales y los parámetros sísmicos se mantuvieron equivalentes. La diferencia principal radica en cómo el modelo estructural es generado, transferido y resuelto, ya sea que se desarrolle directamente en ETABS o a través de la integración Revit-

Robot. Los procedimientos AFLE y RSA se aplicaron como métodos de análisis sísmico para cada configuración estructural.

3.1. Etapa N°1: Preparación del caso de estudio

El caso de estudio corresponde a un edificio de concreto armado de 10 niveles con sistema pórtico en X y dual en Y, representativo de edificaciones de mediana altura en Lima. La altura de entrepiso es de 4,00 m en el primer nivel y 2,80 m desde el segundo hasta el décimo nivel. La planta se organiza en una retícula ortogonal con una dimensión total aproximada de 35,00 m en la dirección X y 16,00 m en la dirección Y. Las losas aligeradas en dos direcciones se parametrizaron con espesores de 25 cm en el primer piso, 20 cm entre el segundo y el noveno piso y 17 cm en el décimo piso, como se aprecia en las vistas en planta y en el modelo 3D del edificio. Este nivel de detalle geométrico es coherente con la forma en que se configuran modelos BIM para análisis sísmico de edificios de concreto armado de mediana altura [20].

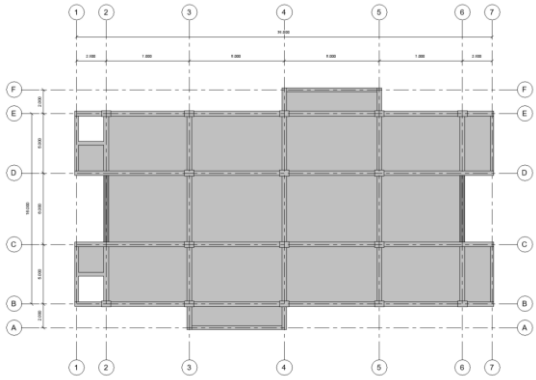


Ilustración 2 Vista en planta piso 1,3,5,7,9
Fuente: Elaboración propia.

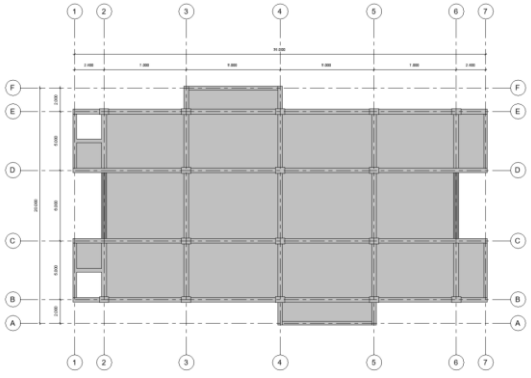


Ilustración 3 Vista en planta piso 2,4,6,8
Fuente: Elaboración propia.

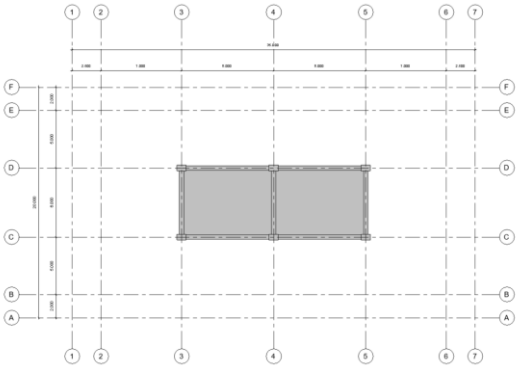


Ilustración 4 Vista en planta piso 10
Fuente: Elaboración propia.

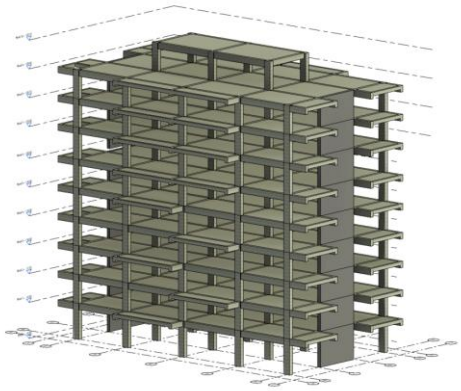


Ilustración 5 Vista 3D en Revit
Fuente: Elaboración propia.

Las secciones estructurales se definieron mediante familias paramétricas: vigas de 0,50×0,70 m en la dirección X y 0,50×0,60 m en la dirección Y, columnas de 0,80×0,60 m, y placas de 0,40 m de espesor en el núcleo y en alineaciones principales. Se verificó la continuidad de los elementos en las intersecciones viga–columna–placa, la coincidencia entre niveles y la asignación correcta de materiales, de manera que el modelo físico BIM fuera consistente con el sistema resistente previsto en la investigación. Trabajos recientes muestran que la calidad de la definición de secciones y familias estructurales en el modelo BIM condiciona directamente la calidad del modelo analítico y la confiabilidad de los resultados de derivas y esfuerzos [20] y [21].

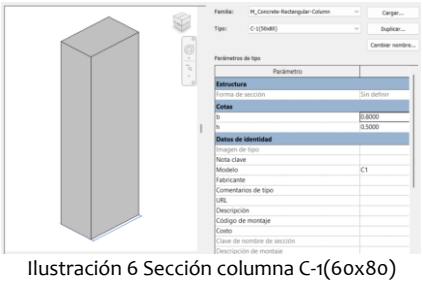


Ilustración 6 Sección columna C-1(60x80)
Fuente: Elaboración propia.

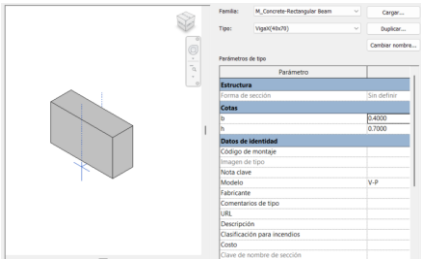


Ilustración 7 Sección Vigax(50x70)
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 8 Sección MURO40
Fuente: Elaboración propia.

Con el modelo físico consolidado, se aplicó la herramienta de automatización analítica de Revit ("De físico a analítico para edificios") para derivar un modelo analítico consistente, compuesto por barras y paneles conectados, alineados a niveles y sin discontinuidades, listo para su exportación a un software de análisis estructural. En el panel de configuración se eligieron únicamente elementos estructurales como vigas, columnas, losas y placas. Se activó la actualización de parámetros y geometría, y se estableció una tolerancia de unión menor para atraer los extremos cercanos y cerrar pequeñas grietas en la malla. También se permitió el ajuste automático al nivel más cercano, para asegurar que los diafragmas por piso sean planos, según lo recomiendan los procesos BIM+FEA enfocados en evaluación sísmica [20], [22] y [23].

La generación del modelo analítico se realizó usando la herramienta Physical to Analytical for Buildings de Revit, que transforma los elementos físicos ya definidos en un modelo estructural para análisis. El proceso comienza con la selección de los elementos estructurales físicos, como vigas, columnas, losas y muros. A partir de estos, el sistema genera automáticamente barras para elementos lineales y paneles para elementos superficiales. Para asegurar la continuidad del modelo, se definió una tolerancia geométrica reducida, lo que permite corregir automáticamente pequeñas discontinuidades y cerrar microhuecos en las conexiones entre viga-columna, viga-losa y muro-losa. Además, se activó la actualización de parámetros y geometría, para que las propiedades mecánicas y secciones del modelo físico se reflejen correctamente en el modelo analítico. El ajuste automático al nivel estructural más cercano garantizó que los diafragmas por piso fueran co-planares, algo fundamental para la transmisión adecuada de fuerzas laterales en el análisis sísmico. Para la corrección geométrica, se estableció un orden de prioridad: primero los muros, luego las columnas y finalmente las vigas, evitando desalineaciones en los ejes analíticos. El modelo analítico obtenido mantiene una relación directa con su versión física, lo que permite actualizaciones consistentes dentro del flujo BIM+FEA.

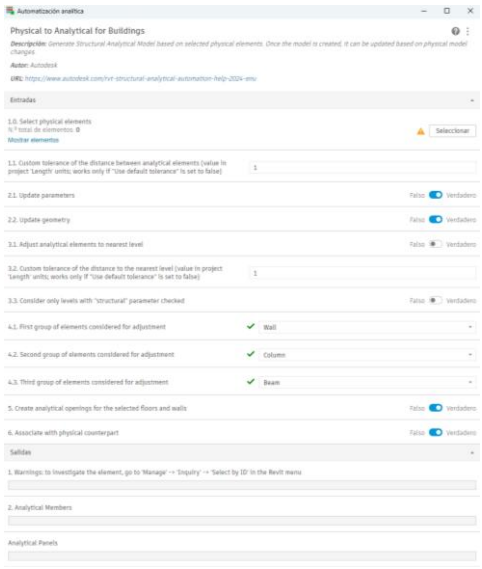


Ilustración 4 Configuración de la herramienta "Physical to Analytical for buildings" en Revit para la generación del modelo analítico estructural.
Fuente: Elaboración propia.

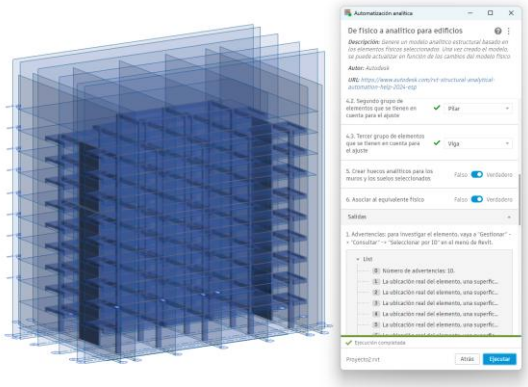


Ilustración 5 Procesamiento de la automatización analítica del edificio.
Fuente: Elaboración propia.

Antes de realizar el intercambio con los analizadores, se revisó la orientación de los ejes locales en vigas, columnas, muros y losas, se comprobó la coincidencia exacta entre los niveles y se eliminaron los offsets o elementos residuales que podrían causar rigideces incorrectas. El proceso de automatización analítica y el resultado de la vista analítica del edificio se muestran en las ilustraciones correspondientes. Este procedimiento reduce el tiempo necesario para la depuración manual, corrige nudos sueltos o paneles sin anclaje y mejora la calidad numérica de la malla, estandarizando el flujo BIM+FEA de acuerdo con experiencias previas de integración entre modelos BIM y motores de análisis estructural [22] y [23].

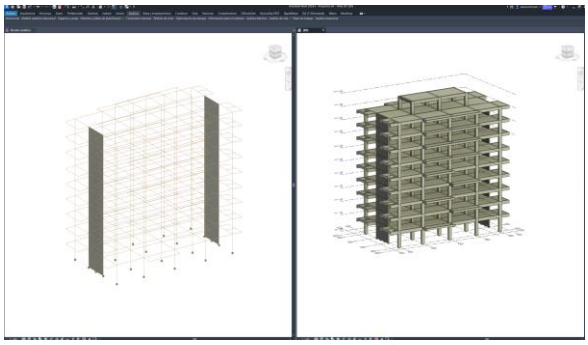


Ilustración 6 Resultado de la vista analítica del edificio – Modelo BIM 10 niveles
Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de reforzar la validez del contraste entre metodologías y evaluar la sensibilidad de la respuesta sísmica frente a la altura, se consideraron dos configuraciones estructurales adicionales basadas en el caso principal: un edificio de 6 niveles y otro de 12 niveles, manteniendo igual la distribución estructural en planta, la tipología resistente, las secciones transversales y las propiedades mecánicas de los materiales. Los modelos complementarios se desarrollaron a partir del mismo modelo matemático base, modificando únicamente el número de niveles y la altura total de la edificación, de modo que las diferencias en períodos, derivas y demandas sísmicas puedan atribuirse principalmente al efecto de la altura y no a cambios en la configuración estructural. El modelo de 6 niveles se evaluó mediante el método de Fuerzas Laterales Equivalentes (AFLE) y el flujo BIM+FEA, ya que se encontró dentro del rango de aplicación del método estático equivalente según la Norma Técnica E.030. En el caso del edificio de 12 niveles, debido a que su altura excede el límite recomendado para el uso del AFLE, el análisis dinámico modal – espectral se aplicó como un procedimiento de comprobación. El análisis de fuerzas laterales equivalentes se aplicó únicamente como información complementaria para fines de comparación. Estos casos adicionales no constituyen el eje central del estudio, sino que se incorporan como verificación complementaria, permitiendo analizar la coherencia de las tendencias observadas en el edificio de 10 niveles y evaluar el impacto de la altura en la estimación de derivas entrepiso bajo distintos enfoques de análisis.

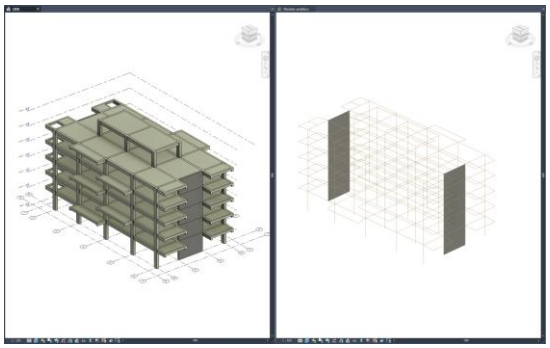


Ilustración 7 Resultado de la vista analítica del edificio – Modelo BIM 6 niveles
Fuente: Elaboración propia.

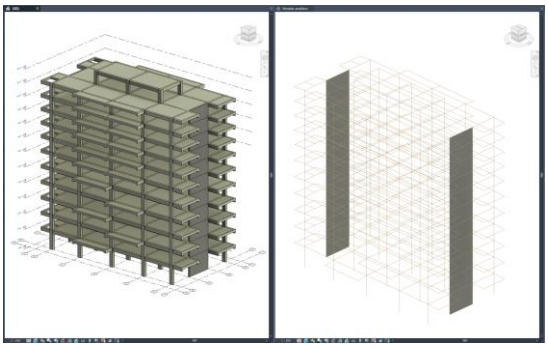


Ilustración 8 Resultado de la vista analítica del edificio - Modelo BIM 12 niveles
Fuente: Elaboración propia.

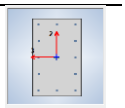
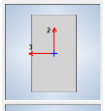
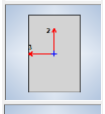
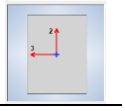
3.2. Etapa N°2.1: Modelado y análisis en ETABS (AFLE)

Para la comparación de metodologías se denominó Método I al análisis por Fuerzas Laterales Equivalentes implementado en un programa de análisis estructural comercial. En el contexto peruano, la Norma Técnica E.030 establece que este procedimiento puede aplicarse en edificaciones regulares de hasta aproximadamente 30 m de altura, siempre que se verifiquen las condiciones de regularidad en planta y elevación y la participación predominante del primer modo de vibración. En el modelo AFLE se replicó la retícula, los niveles, las secciones y los materiales del modelo BIM, de modo que cualquier diferencia de resultados provenga del método de análisis y no de inconsistencias de modelado, siguiendo el criterio adoptado en estudios comparativos entre métodos sísmicos [19].

Los diez niveles se modelaron con entrepisos de 4,00 m en la primera planta y 2,80 m en los niveles superiores. El sistema resistente se definió como pórtico en X y dual en Y, con columnas de 0,60×0,80 m, vigas de 0,30×0,40 m, 0,50×0,60 m y 0,50×0,70 m, placas de 0,40 m y losas aligeradas bidireccionales de 25, 20 y 17 cm de espesor. Los diafragmas se asignaron rígidos por nivel y se emplearon brazos rígidos en apoyos de columnas y arranques de placas para representar diafragmas locales en nudos, en concordancia con la práctica observada en análisis sísmicos de edificios de concreto armado modelados a partir de entornos BIM [20] y [23].

Tabla 1

Características geométricas de los elementos en ETABS

Elemento	Tipo de sección	Dimensiones (cm)	Seccion
Columna	c-1(80x60)	80x60	
Viga X-X	V-1(50x70)	50x70	
Viga Y-Y	V-2(50x60)	50x60	
VA	v-3(30x40)	30x40	

Fuente: Elaboración propia.

El modelo analítico en ETABS se reconstruyó por trazabilidad directa a partir del modelo BIM desarrollado en Revit, preservando la retícula, los niveles, las secciones y los materiales para asegurar que cualquier diferencia de resultados provenga del método de análisis y no de inconsistencias de modelado. Las alturas de entrepiso, los espesores de losas y las dimensiones de vigas, columnas y placas se definieron de forma equivalente a las del modelo BIM, tal como se aprecia en las vistas en planta y 3D del modelo matemático (Ilustración 12). Los diafragmas se declararon rígidos por nivel y se emplearon brazos rígidos en apoyos de columnas y de placas, con el propósito de reproducir el comportamiento in-plane de las losas, de acuerdo con las recomendaciones de diseño para estructuras de concreto armado de mediana altura.

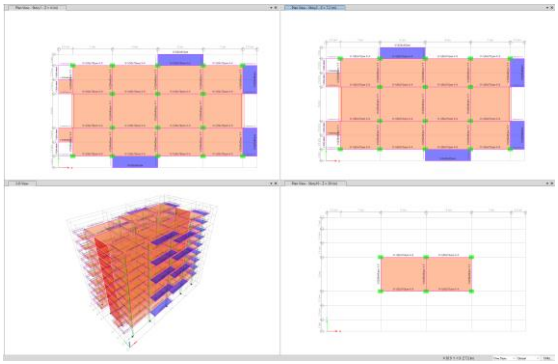


Ilustración 9 Vista en planta y 3D del modelo matemático – 10 niveles
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 16 y 17 se presentan las vistas en planta y en 3D del modelo matemático desarrollado en ETABS para las edificaciones de seis y doce niveles, respectivamente. Dichos modelos se emplearon para la aplicación de los análisis sísmicos estático y dinámico, y tienen como finalidad servir como herramienta de verificación y sustento del comportamiento global de la estructura, permitiendo comprobar la coherencia geométrica, la definición de niveles, la asignación de elementos estructurales y la correcta representación del sistema resistente previo a la evaluación de demandas sísmicas.

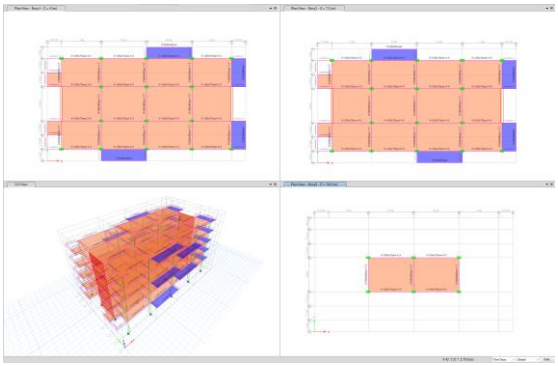


Ilustración 10 Vista en planta y 3D del modelo matemático – 6 niveles
Fuente: Elaboración propia.

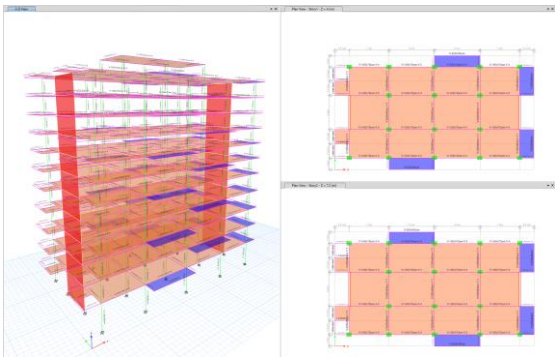


Ilustración 11 Vista en planta y 3D del modelo matemático – 12 niveles
Fuente: Elaboración propia.

Las cargas gravitacionales se construyeron a partir de los espesores de losas aligeradas y de los acabados considerados por nivel, tal como se resume en las tablas de carga muerta (Tablas 2 y 3).

Tabla 2
Detalles de cargas Muertas para cada nivel

Nivel	Espesor e=	Pesos propio kg/m2	Acabados Peso propio kgf/m2	Tabiquería Peso propio kgf/m2
1 er nivel	25 cm	350	100	150
2do al 9no nivel	20 cm	300	100	150
10mo nivel	17 cm	280	100	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3 Carga muerta total para cada nivel

Nivel	Total Peso propio Tnf/m2
1 er nivel	0.60
2do al 9to nivel	0.55
10mo nivel	0.38

Fuente: Elaboración propia.

La carga viva se asignó según el uso "vivienda" y "techo" y, de acuerdo con la clasificación de la Norma E.030.

Tabla 4
Cargas vivas para cada nivel

Nivel	Área(m2)	Uso	Peso Esp T/m2
1 er nivel	549.50	Vivienda	0.20
2do al 5to nivel	549.50	Vivienda	0.20
7mo al 9no nivel	549.50	Vivienda	0.20
10mo nivel	96.00	Techo -	0.10

Fuente: Elaboración propia

La estimación del peso PPP se realiza adicionando a la carga permanente un porcentaje de la carga viva; este enfoque coincide con el utilizado en estudios comparativos de métodos sísmicos, donde se mantiene constante el modelo de masas para evaluar únicamente el efecto del procedimiento de análisis [19]. De manera que, tratándose de una estructura con uso de vivienda, se clasifica como una edificación de categoría C, adoptándose un peso sísmico igual al 100% de la carga permanente más un 25% de la carga viva.

El valor del periodo fundamental de vibración para cada dirección se estimará de acuerdo a la norma E.030.

$$T = \frac{H_n}{C_t} \qquad (1)$$

De acuerdo a las características de sitio, se define el factor de amplificación sísmica (C), según el ítem 18.1 de la norma E.030:

$$T < 0.2T_p \ldots\ldots\ldots C = 1 + 7.5(\frac{T}{T_P})$$
$$0.2T_p \leq T \leq T_p \ldots\ldots\ldots C = 2.5$$
$$T_p < T < T_L \ldots\ldots\ldots C = 2.5(\frac{T_p}{T})$$
$$T > T_L \ldots\ldots\ldots C = 2.5(\frac{T_p T_L}{T^2})$$

La fuerza cortante total en la base de la estructura, correspondiente a la dirección considerada, se determina por la siguiente expresión, según el ítem 34.1 de la norma E.030.

$$V = \frac{ZUCS}{R} P \qquad (2)$$

Los parámetros sísmicos de la RNE 0.30 se combinan para estimar la cortante basal estática equivalente. La amenaza se represente con Z y se pondera por el uso U y la condición de suelo S. La ampliación espectral C(t) se obtiene del espectro del sitio en función del periodo fundamental T.

Para evaluar la irregularidad de rigidez a lo largo de la altura, se tomaron los valores de rigidez lateral por piso que se obtuvieron a través de los programas ETABS y Robot, utilizando la tabla de Rigidez de Pisos, y se aplicaron a las direcciones X e Y. Siguiendo lo estipulado en el Artículo 23 y la Tabla N. ° 11 de la Norma Técnica E. 030, se comprobó que la variación de altura entre el primer piso (4. 00 m) y los niveles superiores (2. 80 m) no origina una irregularidad en la rigidez que se clasifique como piso blando. Para esto, se llevó a cabo una comparación de la rigidez de cada piso en relación a la del piso superior y al promedio de los tres pisos superiores, considerando los límites de 0. 70 y 0. 80 en cada caso.

Tabla 5 Verificación de irregularidad de rigidez en altura – 6 niveles, ETABS

Nivel	Altura (m)	$K_i x(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición	$K_i y(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición
1	4.00	93.89	1.19	1.25	Cumple	473.10	1.64	2.19	Cumple
2	2.80	78.74	1.06	1.12	Cumple	287.84	1.38	1.91	Cumple
3	2.80	73.77	1.03	1.44	Cumple	207.35	1.36	2.36	Cumple
4	2.80	71.56	1.10	—	Cumple	151.68	1.63	—	Cumple
5	2.80	64.57	3.89	—	Cumple	92.79	5.07	—	Cumple
6	2.80	16.58	—	—	—	18.29	—	—	—

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 6 Verificación de irregularidad de rigidez en altura – 6 niveles, Robot Analysis Structure

Nivel	Altura (m)	$K_i x(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición	$K_i y(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición
1	4.00	96.72	1.20	1.26	Cumple	487.30	1.65	2.20	Cumple
2	2.80	80.10	1.07	1.13	Cumple	295.40	1.40	1.93	Cumple
3	2.80	74.80	1.04	1.46	Cumple	211.80	1.38	2.40	Cumple
4	2.80	72.90	1.11	—	Cumple	155.20	1.65	—	Cumple
5	2.80	65.80	3.92	—	Cumple	94.50	5.10	—	Cumple
6	2.80	16.80	—	—	—	18.60	—	—	—

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 7 Verificación de irregularidad de rigidez en altura – 10 niveles, ETABS

Nivel	Altura (m)	$K_i x(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición	$K_i y(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición
1	4.00	150.54	1.24	1.33	Cumple	550.83	1.62	2.02	Cumple
2	2.80	120.67	1.08	1.09	Cumple	338.60	1.31	1.52	Cumple
3	2.80	111.41	1.01	0.93	Cumple	257.81	1.18	1.27	Cumple
4	2.80	109.31	0.98	0.81	Cumple	217.94	1.13	1.14	Cumple
5	2.80	111.50	0.81	0.75	Cumple	192.35	0.98	1.11	Cumple
6	2.80	136.80	0.88	0.94	Cumple	195.89	1.07	1.44	Cumple
7	2.80	154.56	1.01	1.52	Cumple	181.55	1.29	2.23	Cumple
8	2.80	151.79	1.19	—	Cumple	140.51	1.63	—	Cumple
9	2.80	126.88	4.79	—	Cumple	86.05	4.91	—	Cumple
10	2.80	26.47	—	—	—	17.52	—	—	—

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 8 Verificación de irregularidad de rigidez en altura – 10 niveles, Robot Analysis Structure

Nivel	Altura (m)	$K_i x(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición	$K_i y(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición
1	4.00	154.80	1.25	1.33	Cumple	566.40	1.63	2.04	Cumple
2	2.80	123.80	1.08	1.09	Cumple	347.20	1.31	1.52	Cumple
3	2.80	114.30	1.02	0.94	Cumple	263.90	1.18	1.28	Cumple
4	2.80	111.90	0.98	0.81	Cumple	222.80	1.14	1.15	Cumple
5	2.80	114.30	0.82	0.76	Cumple	196.20	0.98	1.11	Cumple
6	2.80	139.50	0.89	0.95	Cumple	200.10	1.08	1.44	Cumple
7	2.80	157.60	1.02	1.52	Cumple	185.60	1.29	2.23	Cumple
8	2.80	154.90	1.20	—	Cumple	143.80	1.63	—	Cumple
9	2.80	129.20	4.80	—	Cumple	88.10	4.90	—	Cumple
10	2.80	27.00	—	—	—	18.00	—	—	—

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 9 Verificación de irregularidad de rigidez en altura – 12 niveles, ETABS

Nivel	Altura (m)	$K_i x(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición	$K_i y(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición
1	4.00	149.45	1.24	1.32	Cumple	530.30	1.64	2.04	Cumple
2	2.80	119.69	1.08	1.09	Cumple	323.36	1.31	1.50	Cumple
3	2.80	110.39	1.01	0.93	Cumple	246.10	1.17	1.23	Cumple
4	2.80	108.32	0.98	0.81	Cumple	209.43	1.11	1.07	Cumple
5	2.80	110.47	0.81	0.74	Cumple	188.09	0.94	0.98	Cumple
6	2.80	135.90	0.88	0.87	Cumple	199.00	1.00	1.13	Cumple
7	2.80	154.48	0.98	1.00	Cumple	198.17	1.11	1.33	Cumple
8	2.80	156.52	1.00	1.10	Cumple	178.14	1.17	1.57	Cumple

Nivel	Altura (m)	$K_i x(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición	$K_i y(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición
9	2.80	155.05	1.04	1.58	Cumple	152.22	1.30	2.26	Cumple
10	2.80	147.97	1.22	—	Cumple	116.79	1.65	—	Cumple
11	2.80	120.69	4.81	—	Cumple	70.52	4.95	—	Cumple
12	2.80	25.04	—	—	—	14.24	—	—	

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 10 Verificación de irregularidad de rigidez en altura – 12 niveles, Robot Analysis Structure

Nivel	Altura (m)	$K_i x(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición	$K_i y(\frac{tonf}{m})$	$\frac{K_i}{K_{i+1}}$	$\frac{K_i}{K_{prom,3}}$	Condición
1	4.00	153.800	1.249	1.275	Cumple	548.200	1.637	2.040	Cumple
2	2.80	123.100	1.082	1.001	Cumple	334.900	1.315	1.497	Cumple
3	2.80	113.800	0.910	0.864	Cumple	254.700	1.176	1.237	Cumple
4	2.80	125.000	0.962	0.877	Cumple	216.500	1.083	1.080	Cumple
5	2.80	130.000	0.929	0.853	Cumple	200.000	0.995	1.031	Cumple
6	2.80	140.000	0.887	0.883	Cumple	201.000	1.002	1.128	Cumple
7	2.80	157.800	0.989	1.011	Cumple	200.500	1.113	1.328	Cumple
8	2.80	159.600	1.010	1.108	Cumple	180.200	1.169	1.570	Cumple
9	2.80	158.000	1.048	1.581	Cumple	154.100	1.300	2.257	Cumple
10	2.80	150.800	1.221	—	Cumple	118.500	1.650	—	Cumple
11	2.80	123.500	4.824	—	Cumple	71.800	4.952	—	Cumple
12	2.80	25.600	—	—	—	14.500	—	—	—

Fuente: *Elaboración propia*

Parámetros sísmicos	
Zona 4	Z=0.45
Uso: Categoría común C	U=1.00
Suelo S2	S=1.10
Perfil del suelo	Tp=0.60 , TL=2.00
Coeficiente básico de reducción (Dir X)	R0=8
Coeficiente básico de reducción (Dir Y)	Ro=7
Irregularidad en planta	Ia=1.00
Irregularidad en altura	Ip=1.00
Rx=Ro.Ia.Ip	8.00
Ry=Ro.Ia.Ip	7.00
Hn - 6 niveles	18.0
Hn - 10 niveles	29.2
Hn - 12 niveles	34.8
CT, Dir X	35
Periodo fundamental para Dir. X, T=Hn/CT – 6 niveles	0.51 s
Periodo fundamental para Dir. X, T=Hn/CT – 10 niveles	0.83 s
Periodo fundamental para Dir. X, T=Hn/CT – 12 niveles	0.99 s
CT, Dir Y	60
Periodo fundamental para Dir. Y, T=Hn/CT – 6 niveles	0.30 s
Periodo fundamental para Dir. Y, T=Hn/CT – 10 niveles	0.49 s
Periodo fundamental para Dir. Y, T=Hn/CT – 12 niveles	0.58 s
Factor de amplificación sísmica, C=2.5(Tp/T), C≤2.5 , X – 6 niveles	2.50
Factor de amplificación sísmica, C=2.5(Tp/T), C≤2.5 , Y – 6 niveles	2.50
Factor de amplificación sísmica, C=2.5(Tp/T), C≤2.5 , X – 10 niveles	1.80

Factor de amplificación sísmica, C=2.5(Tp/T), C≤2.5 , Y– 10 niveles	2.50
Factor de amplificación sísmica, C=2.5(Tp/T), C≤2.5 , X – 12 niveles	1.52
Factor de amplificación sísmica, C=2.5(Tp/T), C≤2.5 , Y – 12 niveles	2.50

Fuente: Elaboracion propia

Con los parámetros sísmicos definidos en la tabla 5, se construyó el espectro de diseño conforme al Art. 39 de la norma E.030. El espectro se utilizó para la determinación de la fuerza cortante basal y la evaluación de la respuesta sísmica de las estructuras de 6, 10 y 12 niveles.

Asi mismo, se identificaron los periodos fundamentales obtenidos mediante el análisis modal en ETABS y ROBOT ANALYSIS STRUCTURE, con el propósito de verificar su ubicación dentro del espectro y evaluar la sensibilidad del flujo BIM+FEA respecto al método AFLE convencional.

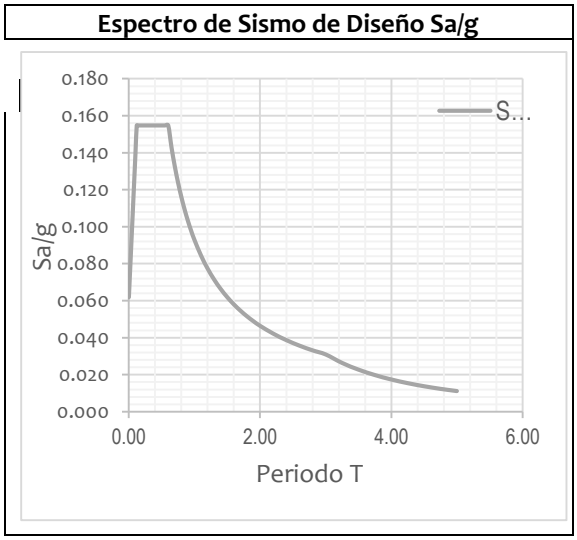


Ilustración 12 Espectro de diseño sísmico de acuerdo a la E030 para suelo tipo S2 y Z4.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Etapa N°2.2: Vinculación Revit – Robot Analysis Structure (BIM+FEA)

En la Etapa N°3, se integró el modelo físico creado en Revit con una plataforma de elementos finitos para realizar el análisis estructural sobre un modelo analítico que puede ser rastreado. Esta integración asegura que la geometría, los ejes de referencia, las secciones y los niveles o diafragmas sean iguales al flujo AFLE, de manera que cualquier diferencia en los resultados se deba al método de análisis y no a errores en el modelado. Este proceso se ajusta a los marcos BIM+FEA que utilizan el modelo BIM como fuente principal de información para evaluar el riesgo sísmico y predecir daños en edificios nuevos o existentes [20], [22], [23] y [24].

Se partió del modelo físico en Revit y se generó su contraparte analítica cuidando que todas las líneas analíticas quedaran estrictamente coincidentes con los ejes del proyecto y con los planos de nivel definidos; para ello se eliminaron offsets no intencionados en barras y paneles y se ajustaron los puntos de control en encuentros viga–columna–placa. Se auditó la conectividad del grafo analítico (sin nudos huérfanos, sin duplicados ni solapes) y se corrigieron micro-gaps que pudieran inducir rigideces espurias o impedir la transferencia adecuada de esfuerzos. Estas acciones son coherentes con las recomendaciones de [20] y [23], para garantizar que el modelo analítico derivado del BIM sea topológicamente consistente y adecuado para

análisis sísmico. Las losas se definieron como diafragmas rígidos por piso, de modo que la inercia del piso se concentre en su centro de masa y se reproduzca el comportamiento del diafragma en el plano, evitando flexibilidades no deseadas en los cálculos. Se comprobó que los extremos de barras no introdujeran rigideces artificiales (empalmes ficticios u offsets indebidos) ni "dientes" de conexión en muros o paneles, y que no existieran elementos residuales que distorsionaran el periodo o la distribución de fuerzas. Con estas acciones, la geometría analítica quedó consistente con el modelo físico, lista para la transferencia a Robot, garantizando trazabilidad en niveles, secciones y diafragmas para el análisis BIM+FEA, en línea con los flujos reportados por [22] y [23].

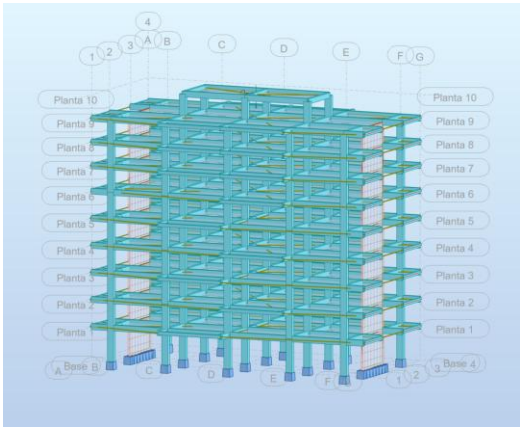


Ilustración 13 Modelo matemático de 10 niveles vinculado Revit - Robot 3D
Fuente: Elaboración propia.

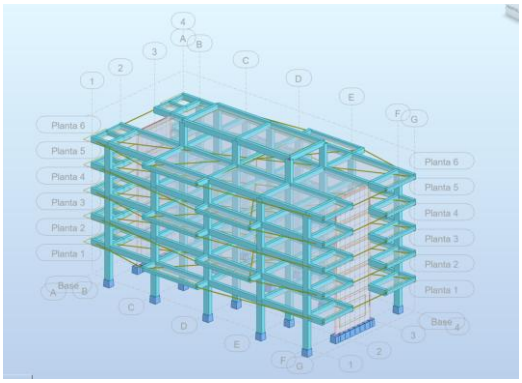


Ilustración 14 Modelo matemático de 6 niveles vinculado Revit - Robot 3D, empleado para la verificación de consistencia geométrica.
Fuente: Elaboración propia.

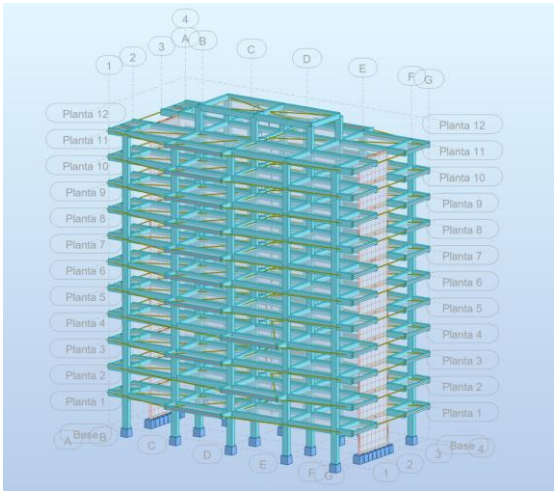


Ilustración 15 Modelo matemático de 12 niveles vinculado Revit - Robot 3D, empleado para la verificación de consistencia geométrica.
Fuente: Elaboración propia.

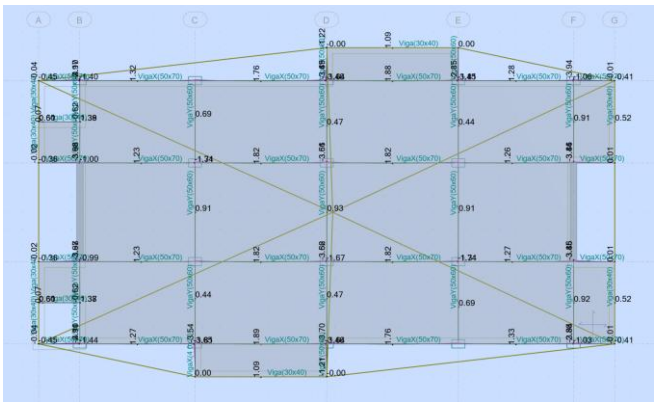


Ilustración 16 Vista en planta 1,3,5,7,9 piso Robot Analysis Structure
Fuente: Elaboración propia.

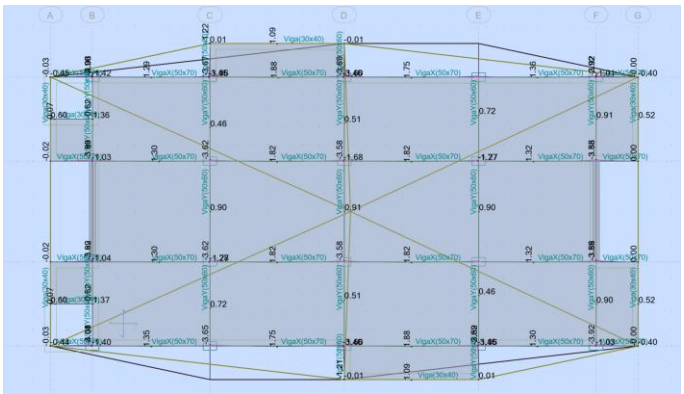


Ilustración 17 Vista en planta 2,4,6,8 Robot Analysis Structure
Fuente: Elaboración propia.

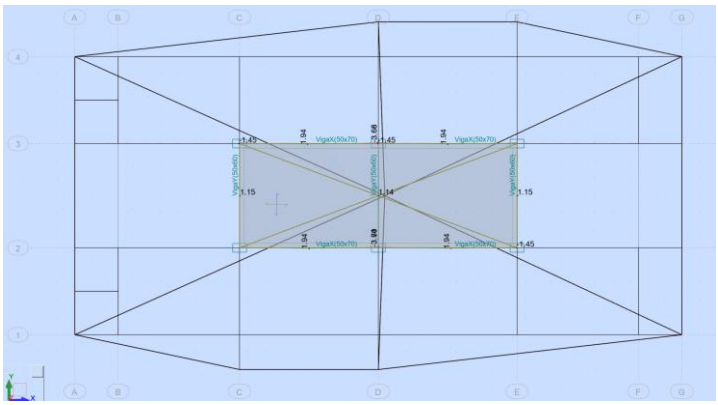
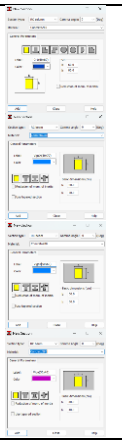


Ilustración 18 Vista en planta 10 en Robot Analysis Structure
Fuente: Elaboración propia.

Se compararon familias y tipos (columnas, vigas, placas y losas) entre Revit y Robot, estableciendo dimensiones precisas y espesores t para evitar sustituciones automáticas.Se unificaron los materiales (módulo E, densidad, ν) y las unidades de trabajo (kN, m, ton) para mantener el peso sísmico y la rigidez efectiva.Se creó un mapa de secciones (nombres y equivalencias) que asegura que la sección utilizada por Robot sea geométrica y mecánicamente igual a la definida en Revit y a la empleada en el AFLE de ETABS.

Tabla 11

Características geométricas de los elementos en ROBOT

Elemento	Tipo de sección	Dimensiones (cm)	Sección
Columna	c-1(80x60)	80x60	
Viga X-X	V-1(50x70)	50x70	
Viga Y-Y	V-2(50x60)	50x60	
VA	v-3(30x40)	30x40	

Fuente: Elaboración propia.

Se verificaron apoyos fijos en la base, utilizando un modelo de cimentación rígida equivalente, y se incluyeron diafragmas rígidos entre los niveles para simular el comportamiento en el plano de las losas. Los muros, placas y losas se analizaron como paneles bidimensionales con un mallado automático de tamaño uniforme, asegurando que los nodos coincidan con los de las barras vecinas. Este enfoque garantiza que la rigidez total y la transferencia de cargas sean equivalentes a las del AFLE, y que los desplazamientos entre niveles se puedan medir de manera clara y precisa.

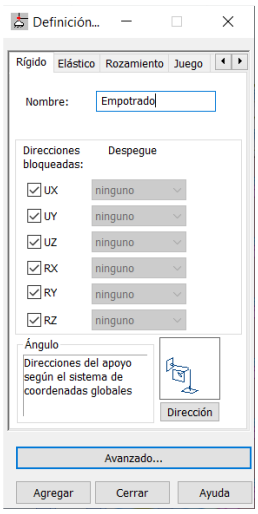


Ilustración 19 Comprobación de Apoyos Empotrados en cada elemento.
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 20 Vista 3D apoyos empotrados – 10 niveles .
Fuente: Elaboración propia.

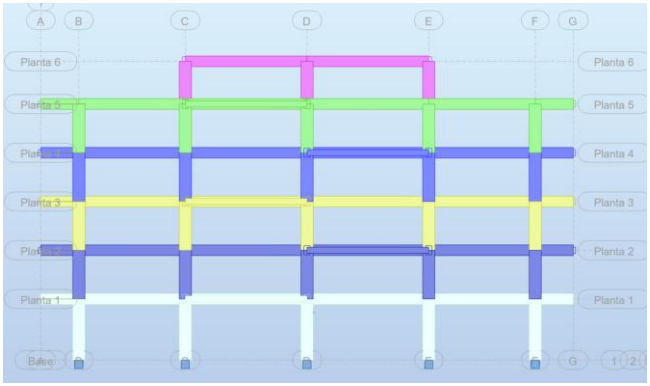


Ilustración 21 Vista 3D apoyos empotrados – 6 niveles
Fuente: Elaboración propia.

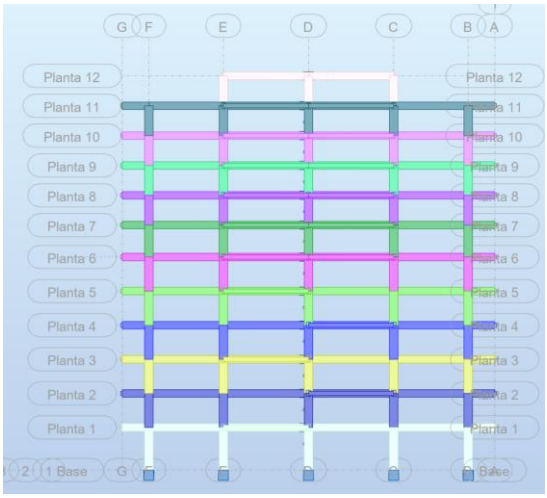


Ilustración 22 Vista 3D apoyos empotrados – 12 niveles
Fuente: Elaboración propia.

En Robot se replicó la fuente de masas (autopeso + cargas permanentes + fracción reglamentaria de sobrecarga) para reproducir el peso sísmico P. Se definieron casos estáticos sísmicos por dirección con los mismos parámetros de sitio (Z,U,S,Tp,TL), el C(T) correspondiente al período adoptado, el factor R del sistema, y la excentricidad accidental ±5 % del diafragma.
Se generaron combinaciones envolventes por dirección. Tras el corrido, se igualó la cortante en base al objetivo normativo mediante factor de escala cuando fue necesario. Finalmente, se extrajeron cortantes por piso, momentos de volteo, desplazamientos y derivas, quedando el modelo listo para la comparación con el AFLE. Estudios que integran BIM con análisis sísmico de detalle muestran que esta estrategia permite evaluar coherentemente la distribución de derivas, el daño y los costos de reparación asociados [22], [23] y [24].

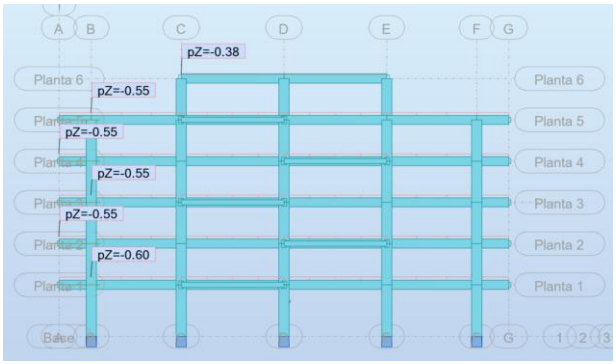


Ilustración 23 Carga muerta asignada a las losas en todos los niveles del edificio 6 niveles.
Fuente: Elaboración propia.

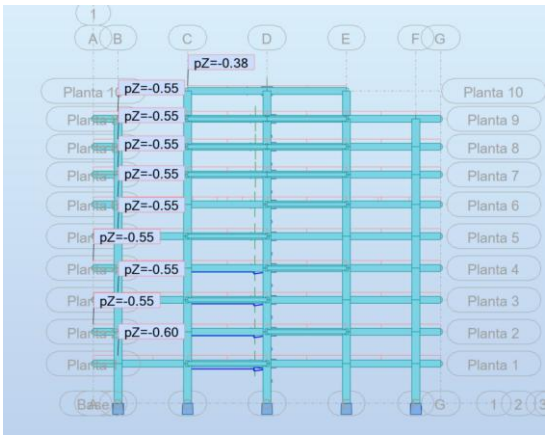


Ilustración 24 Carga muerta asignada a las losas en todos los niveles del edificio 10 niveles.
Fuente: Elaboración propia.

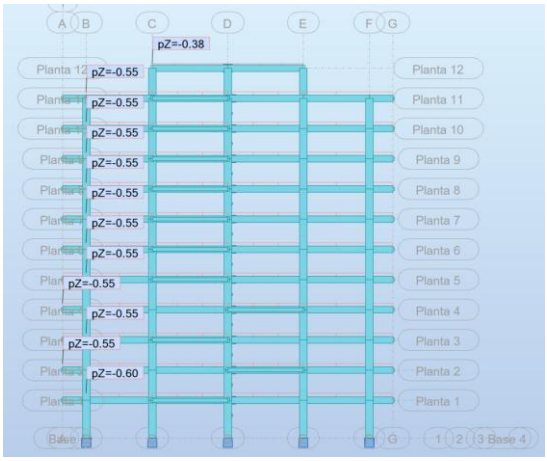


Ilustración 25 Carga muerta asignada a las losas en todos los niveles del edificio 12 niveles.
Fuente: Elaboración propia.

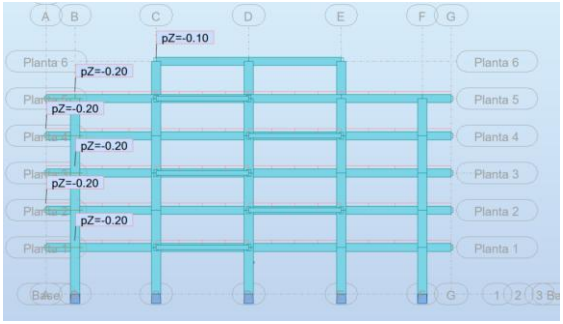


Ilustración 26 Carga viva asignada a las losas aligeradas en todos los niveles del edificio 6 niveles.
Fuente: Elaboración propia.

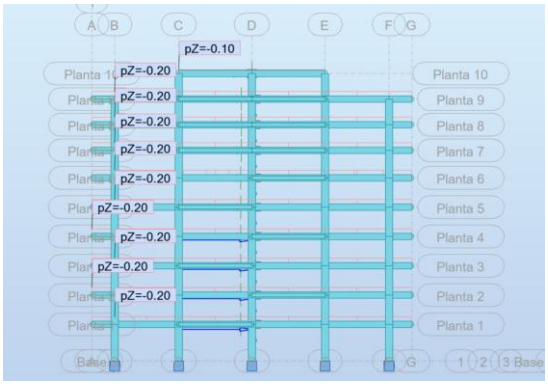


Ilustración 27 Carga viva asignada a las losas aligeradas en todos los niveles del edificio 10 niveles.
Fuente: Elaboración propia



Ilustración 28 Carga viva asignada a las losas aligeradas en todos los niveles del edificio 12 niveles.
Fuente: Elaboración propia

Como etapa final de la metodología, los resultados de ambos métodos se organizaron para su análisis comparativo: peso sísmico por nivel, periodos fundamentales, cortante basal y derivas entrepiso. Sobre las series de diferencias de derivas por nivel se aplicaron pruebas de normalidad y pruebas de hipótesis para muestras relacionadas (Shapiro–Wilk, t de Student y $_3$Wilcoxon), con el propósito de determinar si las discrepancias observadas eran estadísticamente significativas.
El uso conjunto de estas pruebas se ha utilizado en estudios de caracterización de propiedades mecánicas de materiales y en análisis estadísticos relacionados con evaluaciones de desempeño estructural [25]. Lo que respalda su aplicación en el contraste entre el flujo AFLE convencional y el flujo integrado BIM+FEA.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Se compararon, mediante dirección ortogonal, el peso sísmico por nivel y en total, la cortante basal y su distribución vertical, las derivas (elásticas e inelásticas) y los indicadores de torsión, junto con el contraste de los períodos modales frente al valor empírico de norma. El objetivo es identificar diferencias que puedan atribuirse al método de análisis o representación (AFLE–ETABS vs BIM+FEA–Robot), manteniendo constantes la masa, las rigideces, los diafragmas y los parámetros sísmicos.

4.1. Verificación de pesos por nivel para AFLE y BIM+FEA

Antes de realizar cualquier análisis de desplazamientos o cortantes, se verificó la coherencia de la fuente de masa entre el modelo convencional (ETABS) y el modelo integrado BIM+FEA (Revit→Robot). En ambos casos se usó el mismo criterio para calcular la masa sísmica: P = carga muerta total más el 25 % de la carga viva. Se consideró un diafragma rígido por nivel y se asignó masa global. Para garantizar la trazabilidad, los datos se obtuvieron de los informes originales: "Mass Summary by Story" en ETABS y "Masa por planta – Masa global" en Robot. En la Tabla 7, 8 y 9 se muestra la comparación del peso sísmico total obtenido en los modelos desarrollados en ETABS y en el flujo integrado BIM+FEA (Revit–Robot). El peso total del modelo en ETABS es de 3036.05t, mientras que el modelo en Robot registra del orden de 3133.84t, lo que representa una diferencia cercana al 3.22 %. Esta diferencia permite identificar correlación cercana entre masas empleadas en ambos modelos y justifica su comparación a la respuesta estructural.

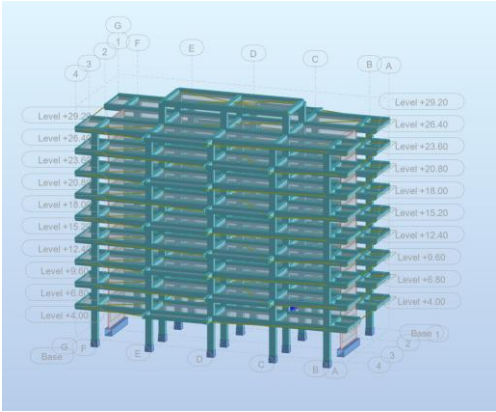


Ilustración 29 Distribucion de pesos - 10 niveles en Robot Analysis Structure
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12
Comparación de pesos AFLE y BIM+FEA para 10 niveles

Nivel	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Planta 1	357.17	372.53	4.30
Planta 2	329.70	339.59	3.00
Planta 3	329.70	339.59	3.00
Planta 4	329.70	339.59	3.00
Planta 5	329.70	339.59	3.00
Planta 6	329.70	339.59	3.00
Planta 7	329.70	339.59	3.00
Planta 8	329.70	339.59	3.00
Planta 9	329.70	339.59	3.00
Planta 10	41.28	44.59	8.02
TOTAL	3036.05	3133.84	

Fuente: Elaboración propia.

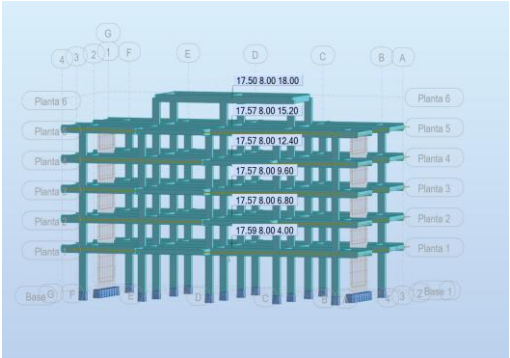


Ilustración 30 Distribucion de pesos - 6 niveles en Robot Analysis Structure
Fuente: Elaboración propia

Tabla 13
Comparación de pesos AFLE y BIM+FEA para 6 niveles

Nivel	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Planta 1	357.17	372.53	4.30
Planta 2	329.70	339.59	3.00
Planta 3	329.70	339.59	3.00
Planta 4	329.70	339.59	3.00
Planta 5	329.70	339.59	3.00
Planta 6	41.28	44.59	8.02
TOTAL	1717.25	1775.48	

Fuente: Elaboración propia.

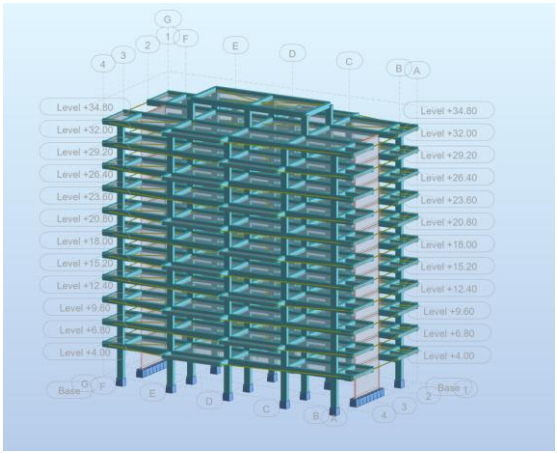


Ilustración 31 Distribucion de pesos - 12 niveles en Robot Analysis Structure
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14
Comparación de pesos AFLE y BIM+FEA para 12 niveles

Nivel	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Planta 1	357.17	372.53	4.30
Planta 2	329.70	339.59	3.00
Planta 3	329.70	339.59	3.00
Planta 4	329.70	339.59	3.00
Planta 5	329.70	339.59	3.00
Planta 6	329.70	339.59	3.00
Planta 7	329.70	339.59	3.00
Planta 8	329.70	339.59	3.00
Planta 9	329.70	339.59	3.00
Planta 10	329.70	339.59	3.00
Planta 11	329.70	339.59	3.00
Planta 12	41.28	44.59	8.02
TOTAL	3695.45	3813.02	

Fuente: Elaboración propia.

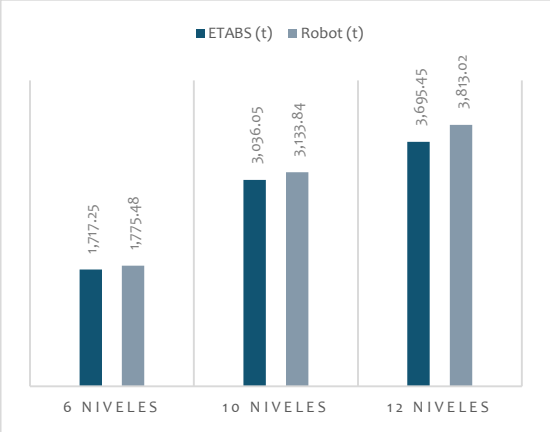


Ilustración 32 Comparación de masa total
Fuente: Elaboración propia

4.2. Análisis de los periodos fundamentales de la estructura

Se analizan los periodos fundamentales de la estructura obtenidos en ambos modelos, ya que estos reflejan directamente la rigidez global y el comportamiento dinámico en cada dirección principal. La Tabla 10,11,12 presenta los periodos de vibración en X e Y calculados mediante el análisis modal en ETABS (modelo AFLE) y en el flujo BIM+FEA Revit–Robot. La comparación de estos valores permite verificar la consistencia entre modelos y evaluar en qué medida las diferencias de idealización estructural influyen en la flexibilidad global antes de revisar los cortantes basales y las derivas entrepiso.

Tabla 15
Comparación de Periodos fundamentales para 10 pisos

Parámetro	AFLE ETABS	BIM + FEA Robot	Δ %
T1x	0.751	0.765	1.87%
T1y	0.509	0.518	1.77%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16
Comparación de Periodos fundamentales para 12 pisos

Parámetro	AFLE ETABS	BIM + FEA Robot	Δ %
T1x	0.897	0.928	3.45%
T1y	0.641	0.663	3.43%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17
Comparación de Periodos fundamentales para 6 pisos

Parámetro	AFLE ETABS	BIM + FEA Robot	Δ %
T1x	0.489	0.497	1.64%
T1y	0.2779	0.282	1.48%

Fuente: Elaboración propia.

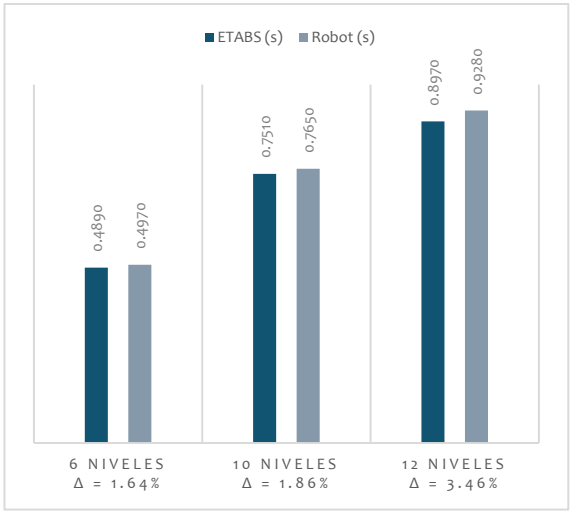


Ilustración 33 Periodos fundamentales con diferencia porcentual en X y Y
Fuente: Elaboración propia

4.3. Comparación de la cortante basal estática y dinámica

El cortante en la base representa la demanda sísmica global que actúa sobre la estructura, por lo que su comparación permite verificar la coherencia entre ambos modelos y evaluar cómo la diferencia en la idealización y en el flujo de trabajo influye en la fuerza sísmica resultante. En la Tabla 8 se presentan los valores de cortante basal para la dirección X, junto con la variación porcentual entre las dos metodologías.

Tabla 18
Comparación de las cortantes de AFLE y BIM+FEA para eje X-Y – 6 niveles

	AFLE ETABS (Ton)		BIM + FEA Robot (Ton)		Δ %
	Eje X-X	Eje Y-Y	Eje X-X	Eje Y-Y	
Configuración de planta	Regular	Regular	Regular	Regular	
V. Estático	265.64	303.59	274.64	313.88	3.39%
V. Dinámico	228.00	275.00	235.50	284.50	3.29%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19
Comparación de las cortantes de AFLE y BIM+FEA para eje X - Y – 10 niveles

	AFLE ETABS (Ton)		BIM + FEA Robot (Ton)		Δ %
	Eje X-X	Eje Y-Y	Eje X-X	Eje Y-Y	
Configuración de planta	Regular	Regular	Regular	Regular	
V. Estático	339.50	536.73	350.43	554.02	3.22%
V. Dinámico	315.00	485.00	325.80	502.00	3.43%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20 Comparación de las cortantes de AFLE y BIM+FEA para eje X - Y – 12 niveles

	AFLE ETABS (Ton)		BIM + FEA Robot (Ton)		Δ %
	Eje X-X	Eje Y-Y	Eje X-X	Eje Y-Y	
Configuración de planta	Regular	Regular	Regular	Regular	
V. Estático	346.45	653.30	357.47	674.09	3.18%
V. Dinámico	330.00	571.00	342.90	589.00	3.91%

Fuente: Elaboración propia.

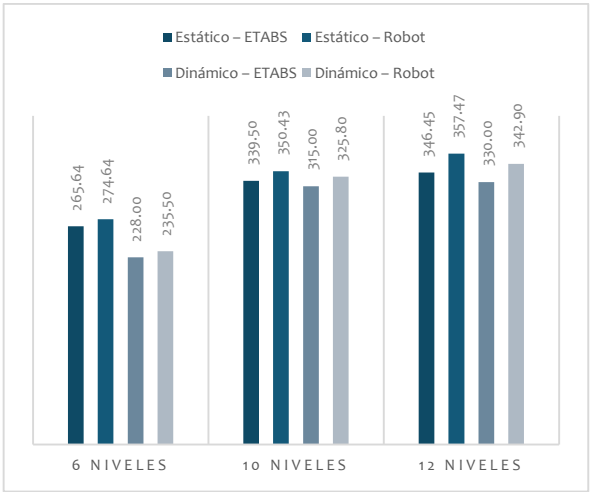


Ilustración 34 Comparacion de cortante basal estatica y dinamica en el eje X
Fuente: Elaboración propia

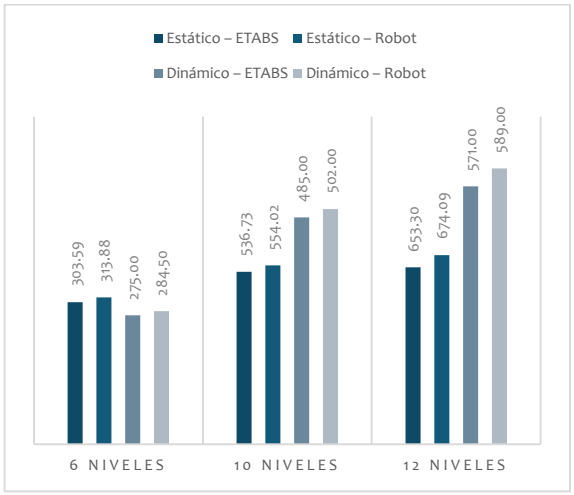


Ilustración 35 Comparación de cortante basal estática y dinámica en el eje Y
Fuente: Elaboración propia

La clasificación que presenta la E.030 para la verificación de sistema estructural en pórticos dice que por lo menos el 80 % del cortante basal actúa sobre las columnas y el sistema dual cuando los muros toman más de 20 % y menos de 70 % del cortante basal.

Tabla 21 Verificacion de sistema estructural - ETABS

Niveles	Dirección	V basal (ton)	Columnas (ton)	Columnas(%)	Muros (ton)	Muros (%)	Sistema Estructural
6	X	265.64	220.00	82.82%	45.64	17.18%	Portico X
6	Y	303.59	180.00	59.29%	123.59	40.71%	Dual Y
10	X	339.50	280.00	82.47%	59.50	17.53%	Portico X
10	Y	536.73	320.00	59.62%	216.73	40.38%	Dual Y
12	X	346.45	290.00	83.70%	56.45	16.30%	Portico X
12	Y	653.30	390.00	59.70%	263.30	40.30%	Dual Y

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22 Verificacion de sistema estructural Robot, Analysis Structure

Niveles	Dirección	V basal (ton)	Columnas (ton)	Columnas(%)	Muros (ton)	Muros (%)	Sistema Estructural
6	X	274.64	227.95	83.00%	46.69	17.00%	Portico X
6	Y	313.88	185.19	59.00%	128.69	41.00%	Dual Y
10	X	350.43	289.00	82.47%	61.43	17.53%	Portico X
10	Y	554.02	330.31	59.62%	223.71	40.38%	Dual Y
12	X	357.47	299.20	83.70%	58.27	16.30%	Portico X
12	Y	674.09	402.43	59.70%	271.66	40.30%	Dual Y

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Desplazamientos laterales de entre piso

Las derivas entrepiso obtenidas en los modelos AFLE (ETABS) y BIM+FEA (Revit–Robot), por tratarse del parámetro principal de comparación en este estudio. Las Tablas X e Y muestran la variación de la deriva a lo largo de la altura del edificio en las direcciones X e Y, respectivamente, así como los valores máximos alcanzados en cada modelo. Estos resultados se contrastan con el límite de deriva establecido por la Norma E.030, con el fin de evaluar el cumplimiento normativo y cuantificar las diferencias que introduce el flujo integrado BIM+FEA frente al enfoque convencional de análisis por fuerzas laterales equivalentes.

Las derivas inelásticas se calcularon a partir de los desplazamientos relativos entrepisos, obtenidos mediante un análisis elástico lineal con las cargas sísmicas reducidas. Para cada entrepiso, la deriva elástica se determinó como la diferencia entre el desplazamiento lateral del nivel considerado y el desplazamiento del nivel inferior, dividida entre la altura de entrepiso, según:

$$\theta_{e,i} = \frac{|u_i - u_{i-1}|}{h_i} \quad (3)$$

Donde u_i representa el desplazamiento lateral del nivel i, u_{i-1}al desplazamiento del nivel inferior y h_i la altura del entrepiso. Luego, conforme de acuerdo con el Art. 50 de la E030, los desplazamientos laterales de estructuras regulares se obtienen multiplicando los resultados del análisis lineal elástico por 0.75R, mientras que para las estructuras irregulares se utiliza 0.85R. Finalmente, las derivas inelásticas obtenidas para la dirección X y Y se compararon con el límite máximo de distorsión de cada nivel establecido en el Art. 51 de la E030. Para edificaciones de concreto reforzado, el límite es:

$$\frac{\Delta_i}{h_i} \leq 0.007 \quad (4)$$

Tabla 23 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje X ETABS

Nivel	**Altura m**	**Desp. mm**	**Derivas Δelástica**	**Derivas inelásticas Δinelástica**	**Derivas inelásticas Δ(%)**	**Deriva límite Δlimite**
Piso 6	18	18.70	0.000882	0.005292	0.529	0.700
Piso 5	15.2	15.43	0.000925	0.005550	0.555	0.700
Piso 4	12.4	11.95	0.000930	0.005580	0.558	0.700
Piso 3	9.6	8.39	0.000872	0.005232	0.523	0.700
Piso 2	6.8	5.01	0.000731	0.004386	0.439	0.700
Piso 1	4	2.13	0.000370	0.002220	0.222	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje Y ETABS

Nivel	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δ	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 6	18	17.20	0.001107	0.005812	0.581	0.700
Piso 5	15.2	14.10	0.001125	0.005906	0.591	0.700
Piso 4	12.4	10.95	0.001143	0.006000	0.600	0.700
Piso 3	9.6	7.75	0.001107	0.005812	0.581	0.700
Piso 2	6.8	4.65	0.000964	0.005062	0.506	0.700
Piso 1	4	1.95	0.000488	0.002559	0.256	0.700
Base	-	—	—	—	0	0.700

Fuente: Elaboración propia.

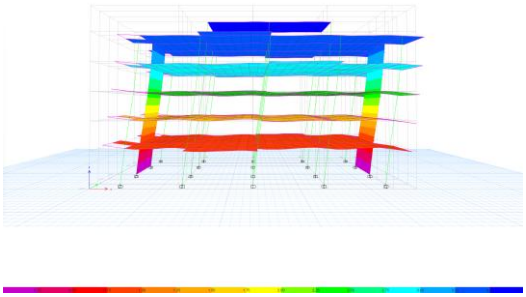


Ilustración 36 Deformaciones - 6 niveles ETABS Eje X
Fuente: Elaboración propia

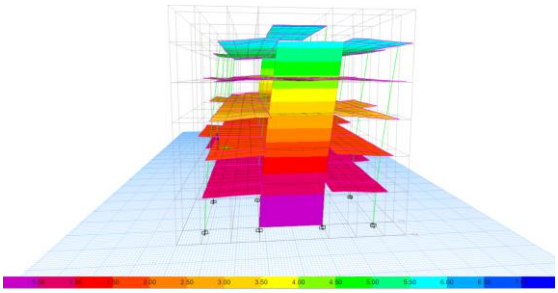


Ilustración 37 Deformaciones - 6 niveles ETABS Eje Y
Fuente: Elaboración propia

Tabla 25 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje X RAE

Nivel	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 6	18	19.10	0.000930	0.005580	0.558	0.700
Piso 5	15.2	15.80	0.000950	0.005700	0.570	0.700
Piso 4	12.4	12.30	0.000930	0.005580	0.558	0.700
Piso 3	9.6	8.70	0.000900	0.005400	0.540	0.700
Piso 2	6.8	5.25	0.000760	0.004560	0.456	0.700
Piso 1	4	2.25	0.000390	0.002340	0.234	0.700
Base	-	—	—	—	0	0.700

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje Y RAE

Nivel	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 6	18	19.00	0.000900	0.004725	0.473	0.700
Piso 5	15.2	15.50	0.000920	0.004830	0.483	0.700
Piso 4	12.4	12.05	0.000900	0.004725	0.473	0.700
Piso 3	9.6	8.60	0.000870	0.004568	0.457	0.700
Piso 2	6.8	5.20	0.000740	0.003885	0.389	0.700
Piso 1	4	2.20	0.000380	0.001995	0.200	0.700
Base	-	—	—	—	0	0.700

Fuente: Elaboración propia.

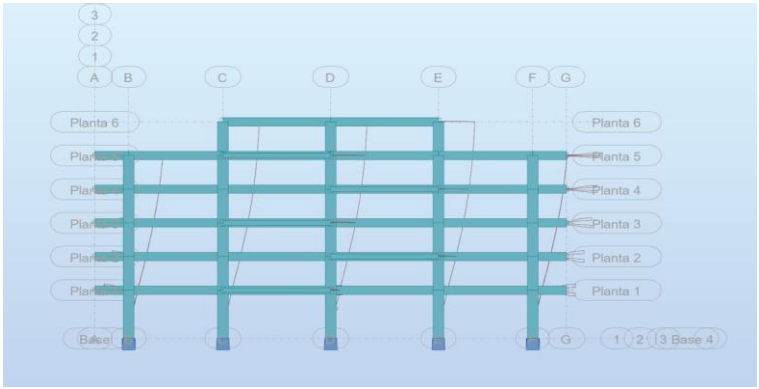


Ilustración 38 Deformaciones - 6 niveles Robot Analysis Structure
Fuente: Elaboración propia

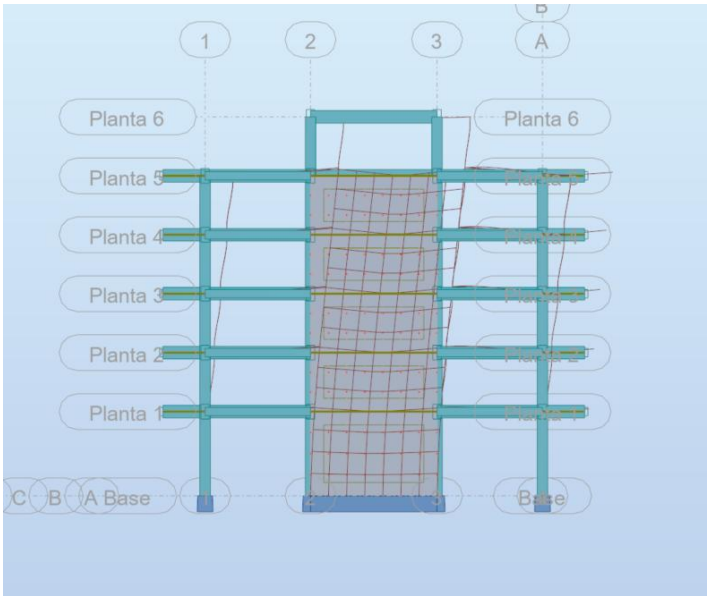


Ilustración 39 Deformaciones - 6 niveles Robot Analysis Structure eje Y
Fuente: Elaboración propia

Tabla 27 Comparación de las derivas inelásticas entre los modelos AFLE y BIM+FEA para 6 niveles

Nivel	Elevación	Deriva de diseño X ETABS	Deriva de diseño X ROBOT	Deriva de diseño Y ETABS	Deriva de diseño Y ROBOT
Piso 6	18	0.005292	0.005580	0.005812	0.004725
Piso 5	15.2	0.005550	0.005700	0.005906	0.004830
Piso 4	12.4	0.005580	0.005580	0.006000	0.004725
Piso 3	9.6	0.005232	0.005400	0.005812	0.004568
Piso 2	6.8	0.004386	0.004560	0.005062	0.003885
Piso 1	4	0.002220	0.002340	0.002559	0.001995

Fuente: Elaboración propia.

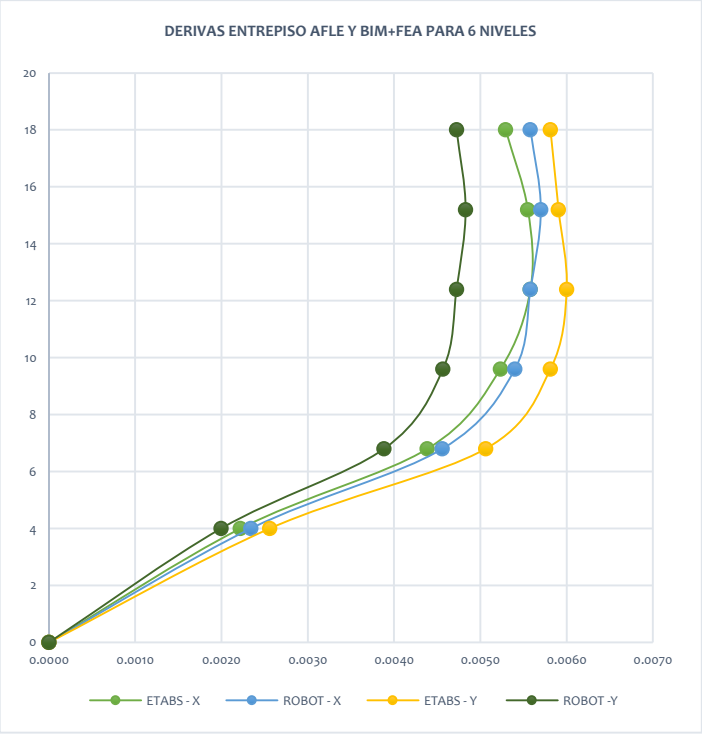


Ilustración 40 Comparacion grafica en la distribucion de las derivas entrepiso para 6 pisos
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje X ETABS

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 10	29.2	18.387	0.000118	0.000707	0.071	0.700
Piso 9	26.4	18.057	0.000198	0.001185	0.119	0.700
Piso 8	23.6	17.504	0.000299	0.001794	0.179	0.700
Piso 7	20.8	16.667	0.000416	0.002496	0.250	0.700
Piso 6	18	15.502	0.000598	0.003585	0.359	0.700
Piso 5	15.2	13.829	0.000879	0.005276	0.528	0.700
Piso 4	12.4	11.367	0.001018	0.006109	0.611	0.700
Piso 3	9.6	8.516	0.001093	0.006559	0.656	0.700
Piso 2	6.8	5.455	0.001067	0.006401	0.640	0.700
Piso 1	4	2.468	0.000617	0.003702	0.370	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje Y ETABS

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 10	29.2	14.274	0.000274	0.001440	0.144	0.700
Piso 9	26.4	13.506	0.000427	0.002243	0.224	0.700
Piso 8	23.6	12.310	0.000468	0.002458	0.246	0.700
Piso 7	20.8	10.999	0.000500	0.002627	0.263	0.700
Piso 6	18	9.598	0.000576	0.003026	0.303	0.700
Piso 5	15.2	7.984	0.000702	0.003684	0.368	0.700
Piso 4	12.4	6.019	0.000694	0.003643	0.364	0.700
Piso 3	9.6	4.076	0.000633	0.003323	0.332	0.700
Piso 2	6.8	2.304	0.000505	0.002651	0.265	0.700
Piso 1	4	0.890	0.000223	0.001168	0.117	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

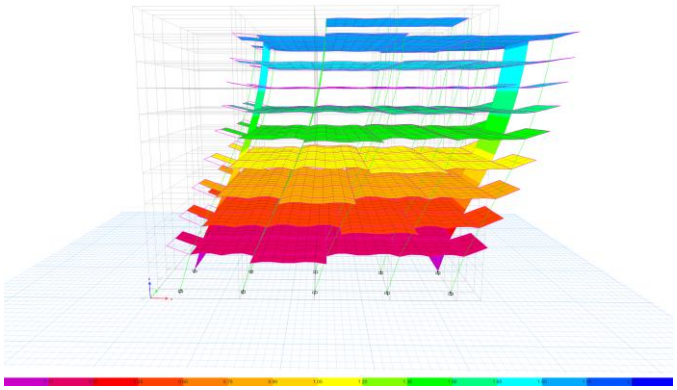


Ilustración 41 Deformaciones - 10 niveles ETABS Eje X
Fuente: Elaboración propia

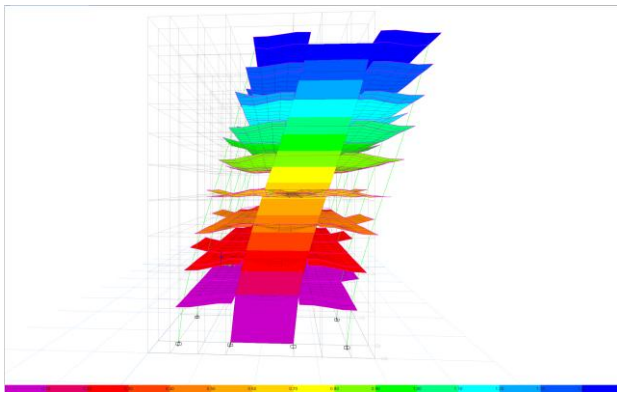


Ilustración 42 Deformaciones - 10 niveles ETABS Eje Y
Fuente: Elaboración propia

Tabla 30 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje X Robot Analysis Structure

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 10	29.2	18.680	0.000121	0.000729	0.073	0.700
Piso 9	26.4	18.340	0.000193	0.001157	0.116	0.700
Piso 8	23.6	17.800	0.000304	0.001821	0.182	0.700
Piso 7	20.8	16.950	0.000429	0.002571	0.257	0.700
Piso 6	18	15.750	0.000607	0.003643	0.364	0.700
Piso 5	15.2	14.050	0.000875	0.005250	0.525	0.700
Piso 4	12.4	11.600	0.001018	0.006107	0.611	0.700
Piso 3	9.6	8.750	0.001118	0.006707	0.671	0.700
Piso 2	6.8	5.620	0.001096	0.006579	0.658	0.700
Piso 1	4	2.550	0.000637	0.003825	0.383	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje Y Robot Analysis Structure

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 10	29.2	14.550	0.000286	0.001500	0.150	0.700
Piso 9	26.4	13.750	0.000436	0.002288	0.229	0.700
Piso 8	23.6	12.530	0.000475	0.002494	0.249	0.700
Piso 7	20.8	11.200	0.000507	0.002663	0.266	0.700
Piso 6	18	9.780	0.000582	0.003056	0.306	0.700
Piso 5	15.2	8.150	0.000711	0.003731	0.373	0.700
Piso 4	12.4	6.160	0.000700	0.003675	0.368	0.700
Piso 3	9.6	4.200	0.000650	0.003413	0.341	0.700
Piso 2	6.8	2.380	0.000514	0.002700	0.270	0.700
Piso 1	4	0.940	0.000235	0.001234	0.123	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

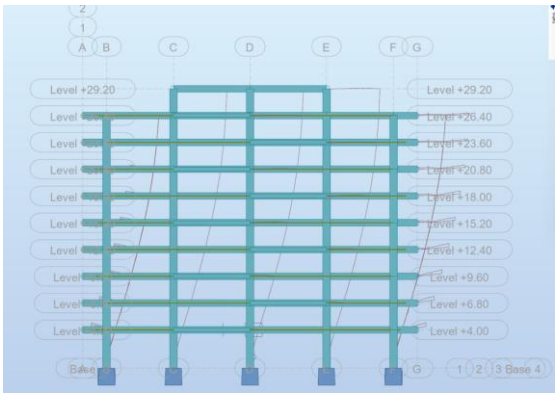


Ilustración 43 Deformaciones - 10 niveles Robot Analysis Structure eje X
Fuente: Elaboración propia

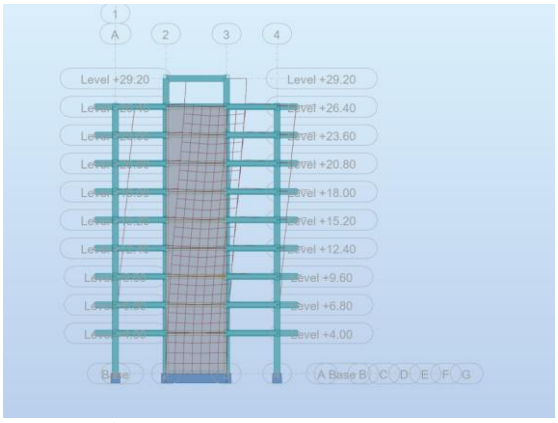


Ilustración 44 Deformaciones - 10 niveles Robot Analysis Structure eje Y
Fuente: Elaboración propia

Tabla 32 Comparación de las derivas inelásticas entre los modelos AFLE y BIM+FEA para 10 niveles

Nivel	Elevación	Deriva de diseño X ETABS	Deriva de diseño X ROBOT	Deriva de diseño Y ETABS	Deriva de diseño Y ROBOT
Piso 10	29.2	0.000707	0.000729	0.001440	0.001500
Piso 9	26.4	0.001185	0.001157	0.002243	0.002288
Piso 8	23.6	0.001794	0.001821	0.002458	0.002494
Piso 7	20.8	0.002496	0.002571	0.002627	0.002663
Piso 6	18	0.003585	0.003643	0.003026	0.003056
Piso 5	15.2	0.005276	0.005250	0.003684	0.003731
Piso 4	12.4	0.006109	0.006107	0.003643	0.003675
Piso 3	9.6	0.006559	0.006707	0.003323	0.003413
Piso 2	6.8	0.006401	0.006579	0.002651	0.002700
Piso 1	4	0.003702	0.003825	0.001168	0.001234

Fuente: Elaboración propia.

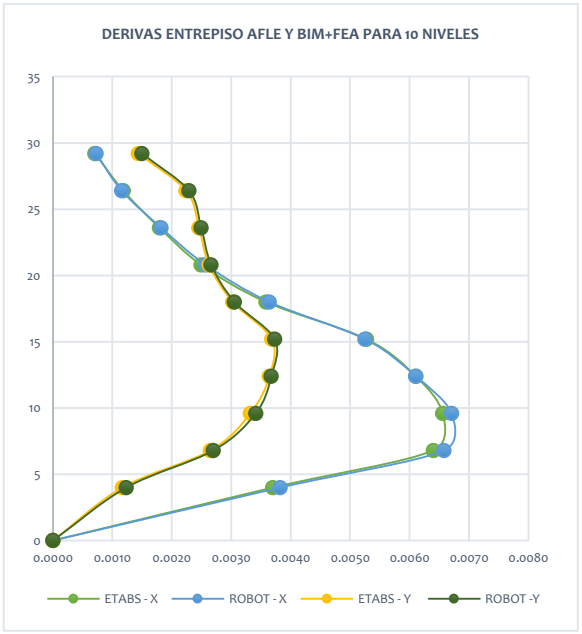


Ilustración 45 Comparacion grafica en la distribucion de las derivas entrepiso para 10 pisos
Fuente: Elaboración propia

Tabla 33 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje X ETABS

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 12	34.8	21.879	0.000104	0.000626	0.063	0.700
Piso 11	32.0	21.587	0.000161	0.000964	0.096	0.700
Piso 10	29.2	21.137	0.000272	0.001633	0.163	0.700
Piso 9	26.4	20.375	0.000351	0.002104	0.210	0.700
Piso 8	23.6	19.393	0.000445	0.002670	0.267	0.700
Piso 7	20.8	18.147	0.000543	0.003255	0.326	0.700
Piso 6	18	16.628	0.000713	0.004275	0.428	0.700
Piso 5	15.2	14.633	0.000985	0.005912	0.591	0.700
Piso 4	12.4	11.874	0.001096	0.006574	0.657	0.700
Piso 3	9.6	8.806	0.001145	0.006870	0.687	0.700
Piso 2	6.8	5.600	0.001100	0.006598	0.660	0.700
Piso 1	4	2.521	0.000630	0.003782	0.378	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje Y ETABS

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 12	34.8	22.308	0.000344	0.001804	0.180	0.700
Piso 11	32.0	21.346	0.000567	0.002978	0.298	0.700
Piso 10	29.2	19.758	0.000536	0.002814	0.281	0.700
Piso 9	26.4	18.257	0.000621	0.003259	0.326	0.700
Piso 8	23.6	16.519	0.000669	0.003510	0.351	0.700
Piso 7	20.8	14.647	0.000704	0.003697	0.370	0.700
Piso 6	18	12.675	0.000796	0.004181	0.418	0.700
Piso 5	15.2	10.445	0.000947	0.004971	0.497	0.700
Piso 4	12.4	7.794	0.000916	0.004811	0.481	0.700
Piso 3	9.6	5.228	0.000821	0.004311	0.431	0.700
Piso 2	6.8	2.929	0.000646	0.003390	0.339	0.700
Piso 1	4	1.121	0.000280	0.001471	0.147	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

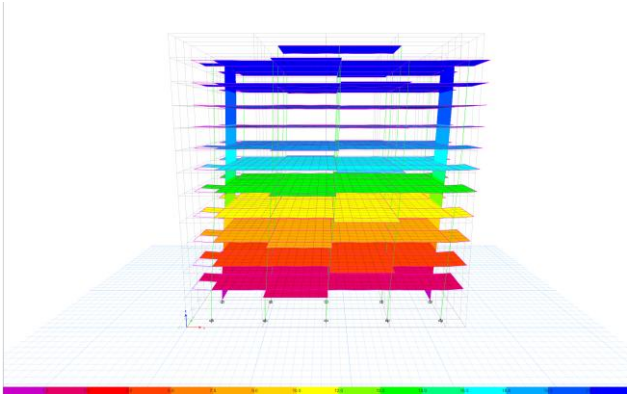


Ilustración 46 Deformaciones - 12 niveles ETABS Eje X
Fuente: Elaboración propia

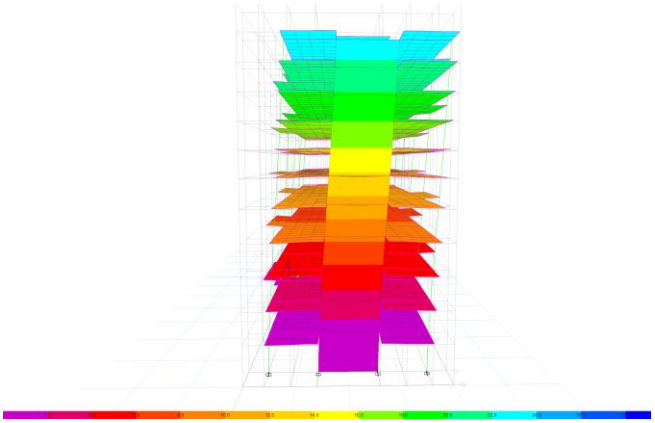


Ilustración 47 Deformaciones - 12 niveles ETABS Eje Y
Fuente: Elaboración propia

Tabla 35 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje X Robot Analysis Structure

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 12	34.8	22.150	0.000089	0.000536	0.054	0.700
Piso 11	32.0	21.900	0.000161	0.000964	0.096	0.700
Piso 10	29.2	21.450	0.000268	0.001607	0.161	0.700
Piso 9	26.4	20.700	0.000364	0.002186	0.219	0.700
Piso 8	23.6	19.680	0.000475	0.002850	0.285	0.700
Piso 7	20.8	18.350	0.000536	0.003214	0.321	0.700
Piso 6	18	16.850	0.000714	0.004286	0.429	0.700
Piso 5	15.2	14.850	0.001000	0.006000	0.600	0.700
Piso 4	12.4	12.050	0.001096	0.006579	0.658	0.700
Piso 3	9.6	8.980	0.001164	0.006986	0.699	0.700
Piso 2	6.8	5.720	0.001114	0.006686	0.669	0.700
Piso 1	4	2.600	0.000650	0.003900	0.390	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36 Deformaciones, derivas elásticas e inelásticas y cumplimiento normativo - eje Y Robot Analysis Structure

Piso	Altura m	Desp. mm	Derivas Δelástica	Derivas inelásticas Δinelástica	Derivas inelásticas Δ(%)	Deriva límite Δlimite
Piso 12	34.8	22.320	0.000351	0.001839	0.184	0.700
Piso 11	32.0	21.338	0.000559	0.002936	0.294	0.700
Piso 10	29.2	19.773	0.000545	0.002861	0.286	0.700
Piso 9	26.4	18.247	0.000611	0.003205	0.321	0.700
Piso 8	23.6	16.537	0.000679	0.003564	0.356	0.700
Piso 7	20.8	14.635	0.000696	0.003657	0.366	0.700
Piso 6	18	12.685	0.000805	0.004230	0.423	0.700
Piso 5	15.2	10.430	0.000937	0.004919	0.492	0.700
Piso 4	12.4	7.806	0.000924	0.004851	0.485	0.700
Piso 3	9.6	5.220	0.000815	0.004279	0.428	0.700
Piso 2	6.8	2.938	0.000651	0.003417	0.342	0.700
Piso 1	4	1.115	0.000279	0.001464	0.146	0.700
Base	-	-	-	-	0	0.7

Fuente: Elaboración propia.

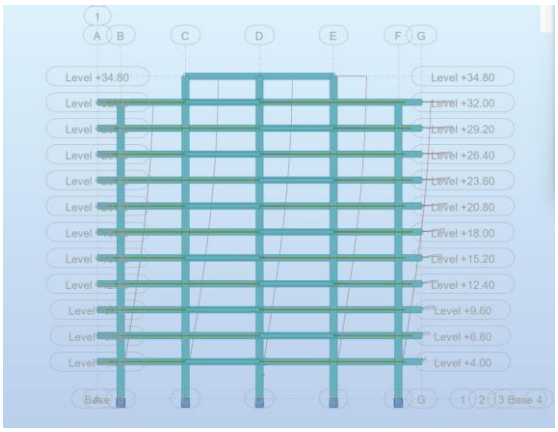


Ilustración 48 Deformaciones - 12 niveles Robot Analysis Structure eje X
Fuente: Elaboración propia.

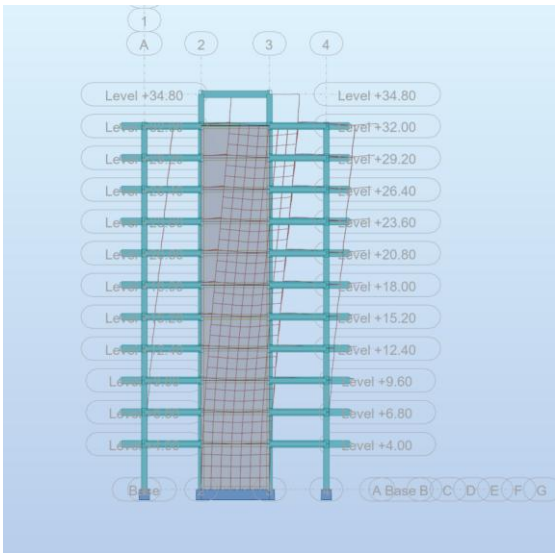


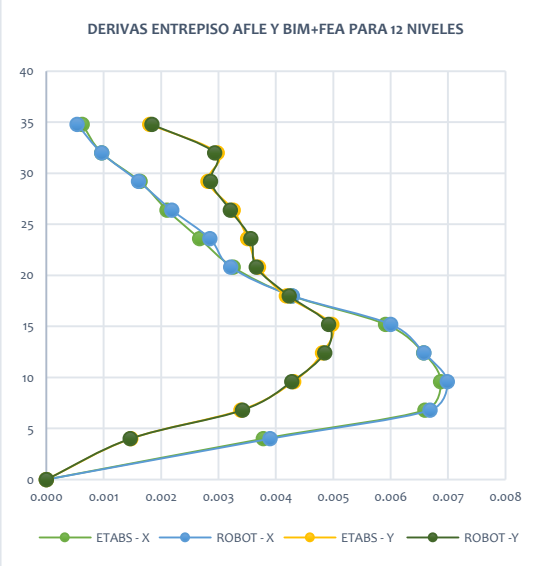
Ilustración 49 Deformaciones - 12 niveles Robot Analysis Structure eje Y
Fuente: Elaboración propia

Tabla 37 Comparación de las derivas inelásticas entre los modelos AFLE y BIM+FEA para 12 niveles

Nivel	Elevación	Deriva de diseño X ETBAS	Deriva de diseño X ROBOT	Deriva de diseño Y ETABS	Deriva de diseño Y ROBOT
Piso 12	34.8	0.000626	0.000536	0.001804	0.001839
Piso 11	32.0	0.000964	0.000964	0.002978	0.002936
Piso 10	29.2	0.001633	0.001607	0.002814	0.002861
Piso 9	26.4	0.002104	0.002186	0.003259	0.003205
Piso 8	23.6	0.002670	0.002850	0.003510	0.003564
Piso 7	20.8	0.003255	0.003214	0.003697	0.003657
Piso 6	18	0.004275	0.004286	0.004181	0.004230
Piso 5	15.2	0.005912	0.006000	0.004971	0.004919
Piso 4	12.4	0.006574	0.006579	0.004811	0.004851
Piso 3	9.6	0.006870	0.006986	0.004311	0.004279
Piso 2	6.8	0.006598	0.006686	0.003390	0.003417
Piso 1	4	0.003782	0.003900	0.001471	0.001464

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 50 Comparacion grafica en la distribucion de las derivas entrepiso para 12 pisos



Fuente: Elaboración propia.

4.4.1. Comparación numérico ingenieril de las derivas

Para permitir una comparación cuantitativa entre los modelos AFLE-ETABS y BIM+FEA-Robot, cada paso de configuración estructural para 6, 10 y 12 niveles fue tratado como una unidad de análisis. Cada nivel fue tratado como una observación pareada ya que la deriva para el mismo entresuelo se derivaba de ambos procedimientos de modelado. Las configuraciones de 6, 10 y 12 niveles fueron tratadas como casos

estructurales separados en lugar de copias independientes de la misma población. Los indicadores de error se calcularon utilizando los valores decimales brutos de los modelos numéricos, mientras que los valores presentados en las tablas siguientes se redondearon únicamente para su visualización.

La comparación tenía por objeto medir las diferencias entre los dos procedimientos utilizando el error absoluto medio y el error relativo máximo.

Para cada entresuelo, el error absoluto se calculó primero por:

$$E_{abs,i} = \left|\theta_{Robot,i} - \theta_{Etabs,i}\right| \qquad (4)$$

Tabla 38 Comparación numérico - ingenieril de las derivas entre ETABS y ROBOT

Configuración	Dirección	Error absoluto medio	Error relativo máximo
6 niveles	X	0.000150	5.44 %
6 niveles	Y	0.001071	23.25 %
10 niveles	X	0.0000687	3.32 %
10 niveles	Y	0.0000491	5.65 %
12 niveles	X	0.0000704	14.38 %
12 niveles	Y	0.0000399	1.94 %

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que el error absoluto medio en las derivas está entre 0,0000399 y 0,0010705, mientras que el error relativo máximo oscila entre 1,94 % y 23,25 %.El error relativo más alto se registró en la configuración con 6 niveles en la dirección Y, con un 23,25 %, seguido de la configuración con 12 niveles en la dirección X, que mostró un 14,38 %.Para las configuraciones con 10 niveles, los errores relativos máximos fueron 3,32 % en X y 5,65 % en Y.En el caso de 12 niveles, la dirección Y tuvo un error relativo máximo de 1,94 %.Estos hallazgos muestran que las diferencias entre los métodos no son iguales en todas las configuraciones y direcciones, por lo que al comparar los resultados, es necesario considerar tanto la evaluación estadística como las particularidades de cada modelo estructural.

4.4.2. Análisis estadístico de las diferencias de deriva

Con el objetivo de llevar a cabo una evaluación estadística de la relación entre los resultados generados por los modelos AFLE–ETABS y BIM+FEA–Robot, se analizaron las variaciones de las derivas entre pisos para cada nivel de los edificios de 6, 10 y 12 niveles, en las direcciones X e Y.
Para cada nivel se calculó la diferencia pareada mediante:

$$\boldsymbol{D_i} = \Delta_{\boldsymbol{Robot,i}} - \Delta_{\boldsymbol{etabs,i}} \qquad (3)$$

Donde Di representa la diferencia de deriva entre ambos modelos para el nivel i

El análisis estadístico se realizó con un nivel de significancia de α=0.05

Tabla 38 Prueba de shapiro-Wilk para las diferencias de deriva

Modelo	Dirección	n	W	p-valor	Resultado
6 niveles	X	6	0.941	0.6647	Normal
6 niveles	Y	6	0.772	0.0321	No normal
10 niveles	X	10	0.932	0.4646	Normal
10 niveles	Y	10	0.887	0.1569	Normal
12 niveles	X	12	0.962	0.8094	Normal
12 niveles	Y	12	0.846	0.0323	No normal

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Selección de la prueba estadística

Tabla 39 Seleccion de prueba estadistica según la prueba shapiro-wilk

Modelo	Dirección	Normalidad	Prueba
6 niveles	X	Si	T pareada
6 niveles	Y	No	Wilconxon
10 niveles	X	Si	T pareada
10 niveles	Y	Si	T pareada
12 niveles	X	Si	T pareada
12 niveles	Y	No	Wilconxon

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4. Prueba de hipótesis para las muestras relacionadas

Para determinar si las variaciones detectadas entre las derivas obtenidas por el análisis convencional de ETABS y el flujo de trabajo BIM+FEA en Revit-Robot son estadísticamente significativas, se llevaron a cabo análisis para muestras pareadas, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Se utilizó la prueba t de Student para muestras pareadas en las configuraciones que mostraron una distribución normal en sus diferencias, mientras que se aplicó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon en aquellos casos que no cumplían con este criterio.

Las hipótesis generales fueron:

$$H_o: \mu_D = 0$$
$$H_1: \mu_D \neq 0$$

$$p > 0.05 \rightarrow no\ se\ rechaza\ H_0$$

$$p \leq 0.05 \rightarrow se\ rechaza\ H_0$$

Modelo	Dirección	Prueba	Estadistico	p-valor	Decision
6 niveles	X	t pareada	3.946	0.0109	Rechazar H_0
6 niveles	Y	Wilcoxon	0.000	0.0313	Rechazar H_0
10 niveles	X	t pareada	2.508	0.0334	Rechazar H_0
10 niveles	Y	t pareada	8.368	0.0000154	Rechazar H_0
12 niveles	X	t pareada	1.934	0.0792	No rechazar H_0
12 niveles	Y	Wilcoxon	38.5	0.9868	No rechazar H_0

Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas entre las derivas de ETABS y Robot para los modelos de 6 niveles en X (p = 0,0109) y en Y (p = 0,0313), así como para los modelos de 10 niveles en X (p = 0,0334) y en Y (p = 0,0000154). En estos casos, se rechaza la hipótesis nula. Para el modelo de 12 niveles, los resultados en X (p = 0,0792) e Y (p = 0,9868) no son estadísticamente significativos al nivel α = 0,05; por tanto, no se rechaza la hipótesis nula. Esto no demuestra que ambos métodos sean equivalentes.

4.5. Diseño estructural de los elementos

A partir de las demandas obtenidas mediante los análisis estructurales, se procedió a evaluar el comportamiento de los principales elementos resistentes en términos de diseño. Para ello, se consideraron las configuraciones estructurales de 6, 10 y 12 niveles, manteniendo la misma distribución estructural en planta y las características generales del sistema resistente. Los modelos fueron evaluados mediante el método de Fuerzas Laterales Equivalentes (AFLE) y el flujo integrado BIM+FEA, incorporándose además el análisis dinámico modal-espectral como procedimiento de comprobación de la respuesta sísmica. A partir de las solicitaciones obtenidas se determinaron los requerimientos de armadura de los principales elementos estructurales, considerando vigas, columnas, placas y losas.

4.5.1. Diseño de Vigas

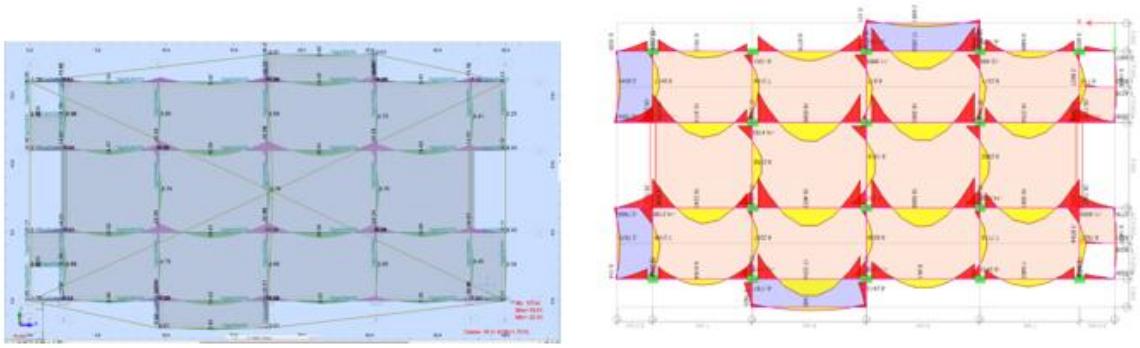


Ilustración 51 Diagramas de momento flector de la viga crítica del modelo de 6 niveles obtenidos mediante ETABS y Robot Structural Analysis.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 40 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la viga critica del modelo de 6 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS	BIM + FEA Robot	Δ %
Mu (+) ton	18.43	18.61	0.98%
Mu (-) ton	31.16	32.80	5.26%
Vu ton	25.20	20.78	17.54%
As positivo cm2	8.70	8.70	0.00%
As negativo cm2	13.75	14.53	5.67%
Armadura inferior	5 Ø 5/8"	5 Ø 5/8"	-----
Armadura superior	5 Ø 3/4"	6 Ø 3/4"	-----
Armadura lateral	1 Ø 5/8" cada lado	1 Ø 5/8" cada lado	-----
Estribos	Ø 3/8" @ 10 cm (extremos) y @20 cm (centro)	Ø 3/8" @ 10 cm (extremos) y @20 cm (centro)	-----

Fuente: Elaboración propia.

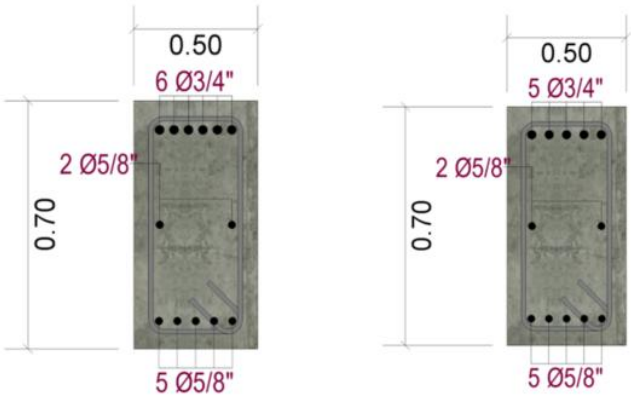


Ilustración 52 Comparación de V(50x70)- 6 niveles
Fuente: Elaboración propia

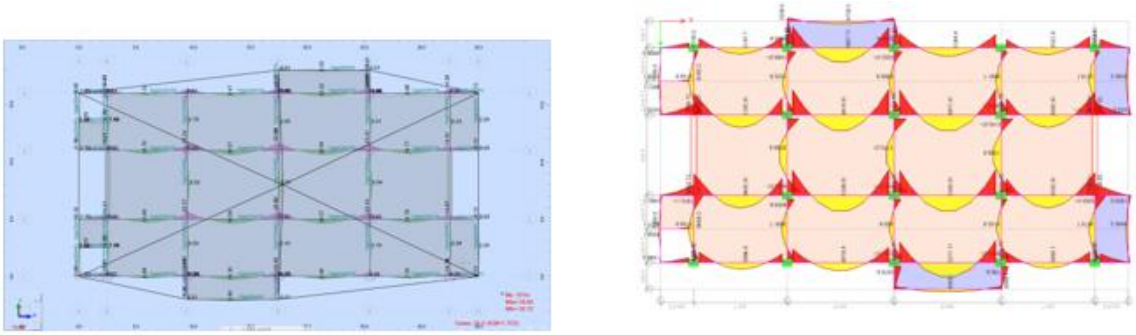


Ilustración 53 Diagramas de momento flector de la viga crítica del modelo de 10 niveles obtenidos mediante ETABS y Robot Structural Analysis.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 41 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la viga critica del modelo de 10 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Mu (+) ton	19.78	19.25	2.68%
Mu (-) ton	32.64	33.90	3.86%
Vu ton	26.31	21.69	17.56%
As positivo cm2	8.44	8.20	2.84%
As negativo cm2	14.24	14.82	4.08%
Armadura inferior	5 Ø 5/8"	5 Ø 5/8"	-----
Armadura superior	6 Ø 3/4"	6 Ø 3/4"	-----
Armadura lateral	1 Ø 5/8" cada lado	1 Ø 5/8" cada lado	-----
Estribos	Ø 3/8" @ 10 cm (extremos) y @20 cm (centro)	Ø 3/8" @ 10 cm (extremos) y @20 cm (centro)	-----

Fuente: Elaboración propia.

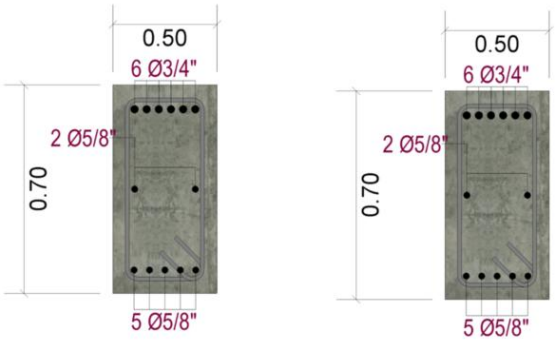


Ilustración 54 Comparación de V(50x70) - 10niveles
Fuente: Elaboración propia

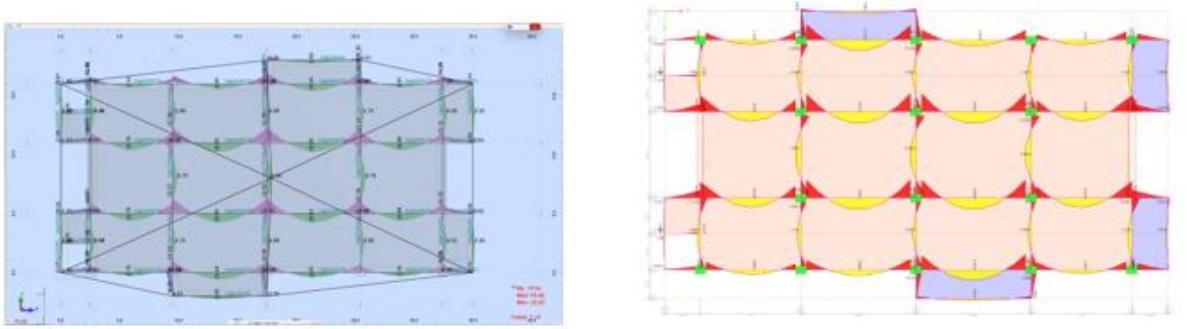


Ilustración 55 Diagramas de momento flector de la viga crítica del modelo de 12 niveles obtenidos mediante ETABS y Robot Structural Analysis.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 42 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la viga critica del modelo de 12 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Mu (+) ton	19.79	18.63	5.86%
Mu (-) ton	32.49	32.58	0.28%
Vu ton	26.27	20.73	21.09%
As positivo cm2	8.70	8.70	0.00%
As negativo cm2	14.38	14.42	0.28%
Armadura inferior	6 Ø 5/8"	6 Ø 5/8"	-----
Armadura superior	6 Ø 3/4"	6 Ø 3/4"	-----
Armadura lateral	1 Ø 5/8" cada lado	1 Ø 5/8" cada lado	-----
Estribos	Ø 3/8" @ 10 cm (extremos) y @20 cm (centro)	Ø 3/8" @ 10 cm (extremos) y @20 cm (centro)	-----

Fuente: Elaboración propia

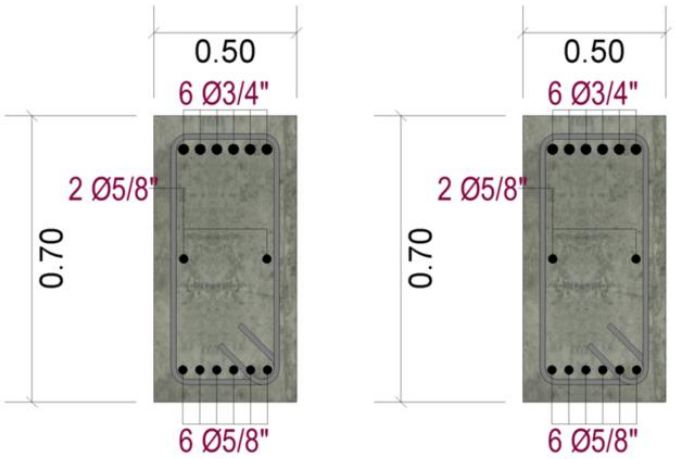


Ilustración 56 Comparación de V(50x70) - 12niveles
Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Diseño de columnas

Tabla 43 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la columna crítica del modelo de 6 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Pu	577.91	566.35	2.00
M2 (+)	-19.21	-18.73	2.50
M3 (-)	40.49	39.68	2.01
Vu2	32.51	31.98	1.62
Vu3	14.06	13.99	0.50
As, min cm2	48	48	------
As requerido cm2	51.30	50.53	1.50
Armadura longitudinal	18 Ø 3/4"	18 Ø 3/4"	------
Estribos	Ø 3/8"@ 10cm (extremos) @ 20 cm (central)	Ø 3/8"@ 10cm (extremos) @ 20 cm (central)	------

Fuente: Elaboración propia.

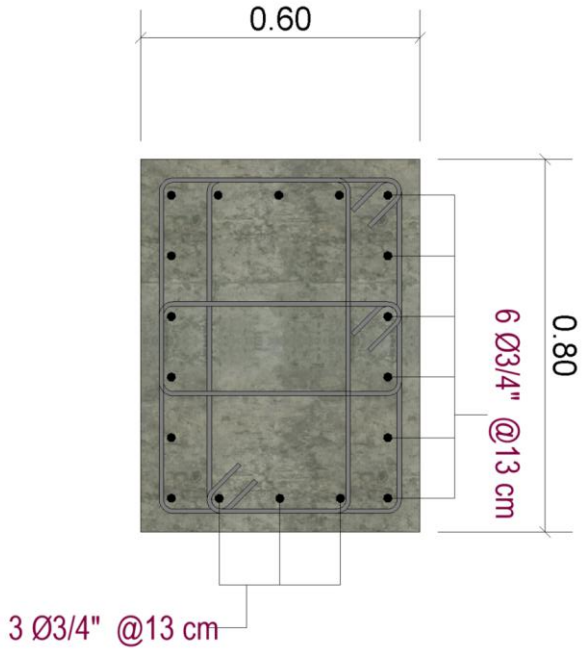


Ilustración 57 C(60x80)cm - 6 niveles en Etabs
Fuente: Elaboración propia

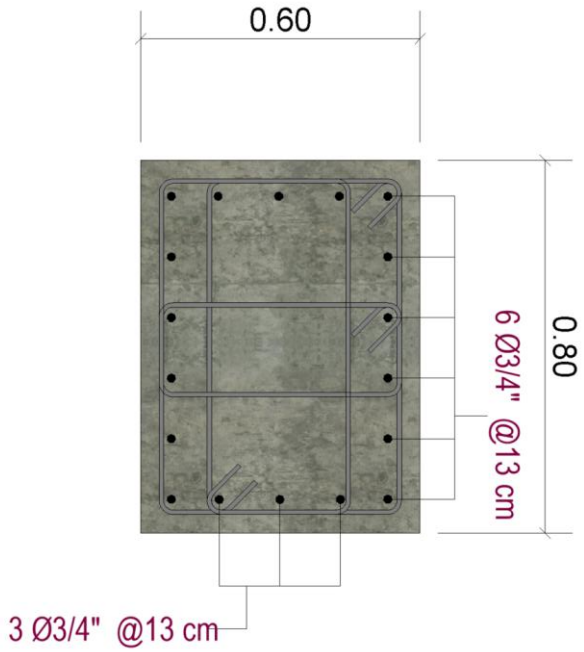


Ilustración 58 C(60x80)cm - 6 niveles en Robot
Fuente: Elaboración propia

Tabla 44 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la columna crítica del modelo de 10 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Pu	953.11	935.95	1.80
M2 (+)	−34.54	−33.92	1.80
M3 (-)	64.96	63.79	1.80
Vu2	36.98	36.31	1.80
Vu3	17.51	17.20	1.80
As, min cm2	48.00	48.00	-----
As requerido cm2	63.00	61.87	1.80
Armadura longitudinal	24 Ø3/4"	22 Ø3/4"	-----
Estribos	Ø 3/8"@ 10cm (extremos) @ 20 cm (central)	Ø 3/8"@ 10cm (extremos) @ 20 cm (central)	-----

Fuente: Elaboración propia.

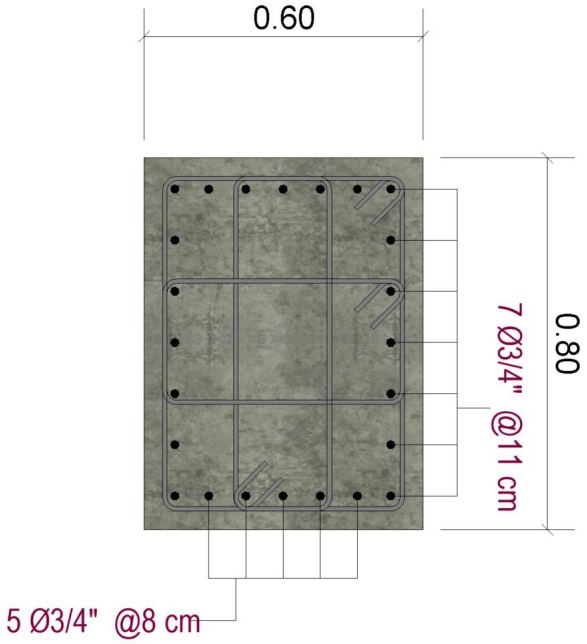


Ilustración 59 C(60x80)cm - 10 niveles Etabs
Fuente: Elaboración propia

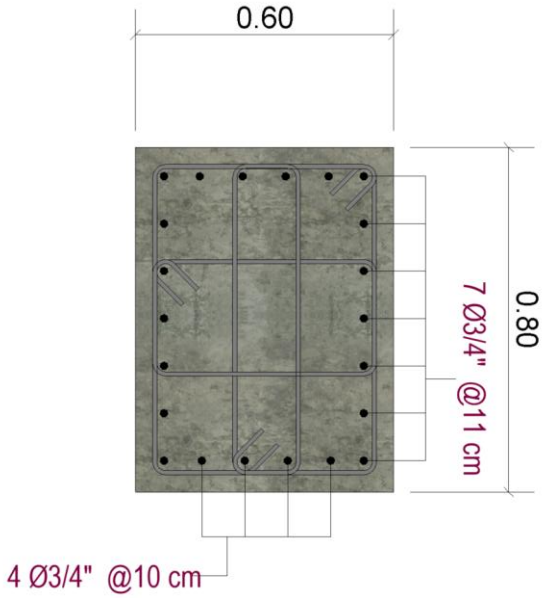


Ilustración 60 C(60x80)cm - 10 niveles Robot
Fuente: Elaboración propia

Tabla 45 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la columna crítica del modelo de 12 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Pu	1035.96	1017.31	1.30
M2 (+)	−37.54	−36.87	2.54
M3 (-)	70.07	68.81	2.50
Vu2	34.09	33.48	3.46
Vu3	17.11	16.80	3.04
As, min cm2	48.00	48.00	-----
As requerido cm2	68.00	66.70	1.38
Armadura longitudinal	24 Ø3/4"	24 Ø3/4"	-----
Estribos	Ø 3/8"@ 10cm (extremos) @ 20 cm (central)	Ø 3/8"@ 10cm (extremos) @ 20 cm (central)	-----

Fuente: Elaboración propia.

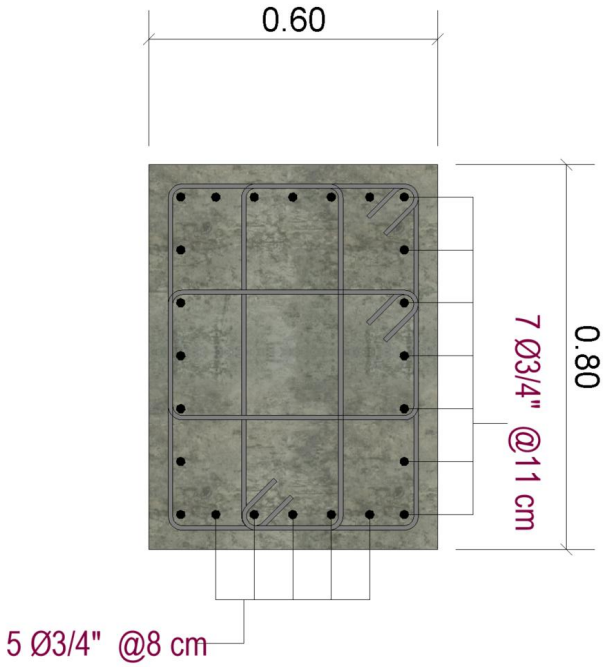


Ilustración 61 C(60x80)cm - 12 niveles Etabs
Fuente: Elaboración propia

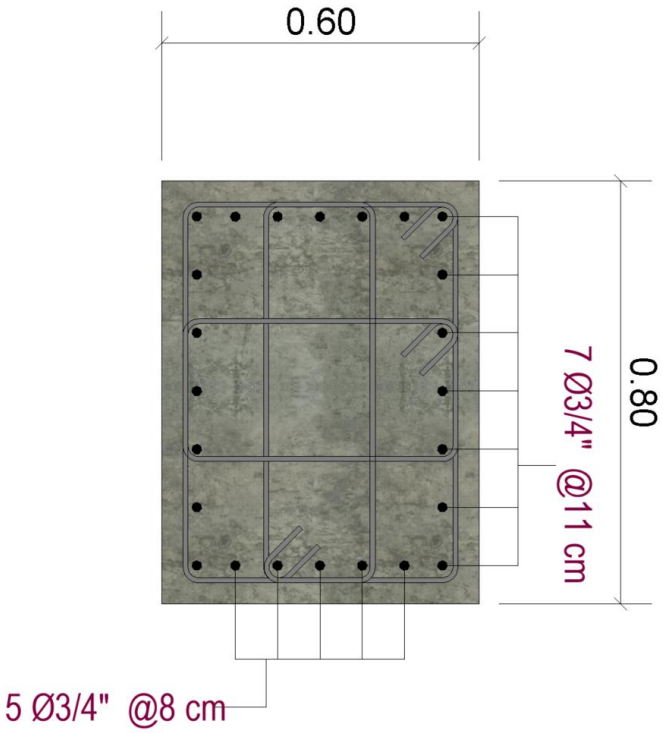


Ilustración 62 C(60x80)cm - 12 niveles Robot
Fuente: Elaboración propia

4.5.3. Diseño de losas

Tabla 46 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la losa en dos direcciones del modelo de 6 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis.

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Mux (+)	1.63	1.58	3.07
Mux (-)	-3.67	-3.56	3.00
Muy (+)	3.57	3.46	3.08
Muy (-)	-3.06	-2.97	2.94
As (x)	6.15	5.97	2.93
As (y)	5.98	5.81	2.84
Armadura X	Ø 1/2"@ 20cm	Ø 1/2"@ 20cm	-----
Armadura Y	Ø 1/2"@ 20cm	Ø 1/2"@ 20cm	-----

Fuente: Elaboración propia.

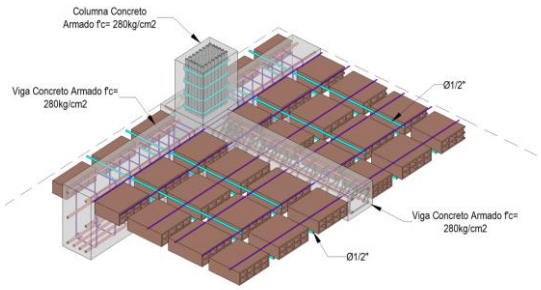


Ilustración 63 Vista 3D losa aligerada en dos direcciones en vinculo BIM – Revit para 6 niveles
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la losa en dos direcciones del modelo de 10 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis.

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Mux (+)	1.82	1.77	2.75
Mux (-)	-4.05	-3.92	3.21
Muy (+)	3.91	3.79	3.07
Muy (-)	-3.38	-3.27	3.25
As (x)	7.24	7.02	3.04
As (y)	6.87	6.66	3.06
Armadura X	Ø 5/8"@ 20cm	Ø 5/8"@ 20cm	-------
Armadura Y	Ø 5/8"@ 20cm	Ø 5/8"@ 20cm	-------

Fuente: Elaboración propia.

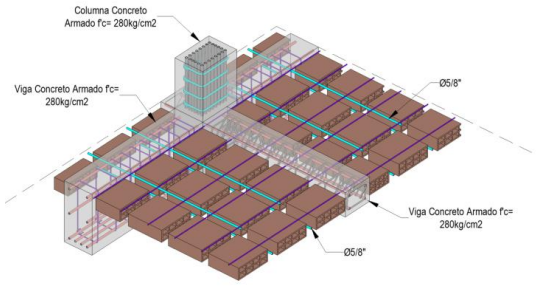


Ilustración 64 Vista 3D losa aligerada en dos direcciones en vinculo BIM – Revit para 10 niveles
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 48 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la losa en dos direcciones del modelo de 12 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis.

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Mux (+)	1.95	1.89	3.08
Mux (-)	-4.32	-4.18	3.24
Muy (+)	4.18	4.05	3.11
Muy (-)	-3.61	-3.49	3.32
As (x)	7.72	7.49	2.98
As (y)	7.47	7.24	3.08
Armadura X	Ø 5/8"@ 20cm	Ø 5/8"@ 20cm	-------
Armadura Y	Ø 5/8"@ 20cm	Ø 5/8"@ 20cm	-------

Fuente: Elaboración propia.

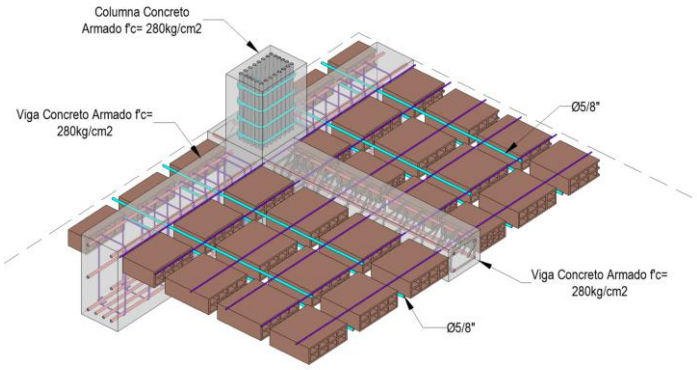


Ilustración 65 Vista 3D losa aligerada en dos direcciones en vinculo BIM – Revit para 12 niveles
Fuente: Elaboración propia.

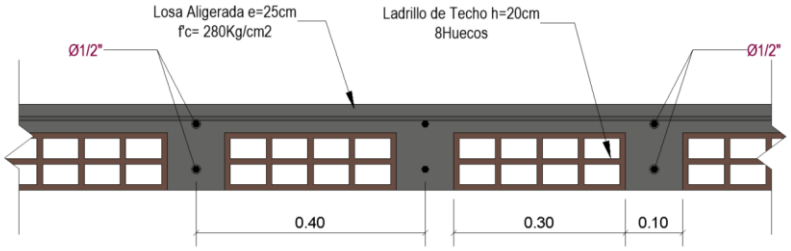


Ilustración 66 Sección típica de losa aligerada dos direcciones en vinculo BIM – Revit
Fuente: Elaboración propia.

4.5.4. Diseño de placas

Tabla 49 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la placa crítica del modelo de 6 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Pu	420.21	407.40	3.00
Mu	185.16	179.45	3.00
Vu	95.02	92.15	3.00
As vertical	20.50	19.88	3.02
As horizontal	14.20	13.77	3.03
Armadura vertical	16 Ø 5/8"	16 Ø 5/8"	-----
Armadura horizontal	Ø 3/8"@ 20cm	Ø 3/8"@ 20cm	-----
Armadura de borde	8 Ø 5/8"	8 Ø 5/8"	-----

Fuente: Elaboración propia.

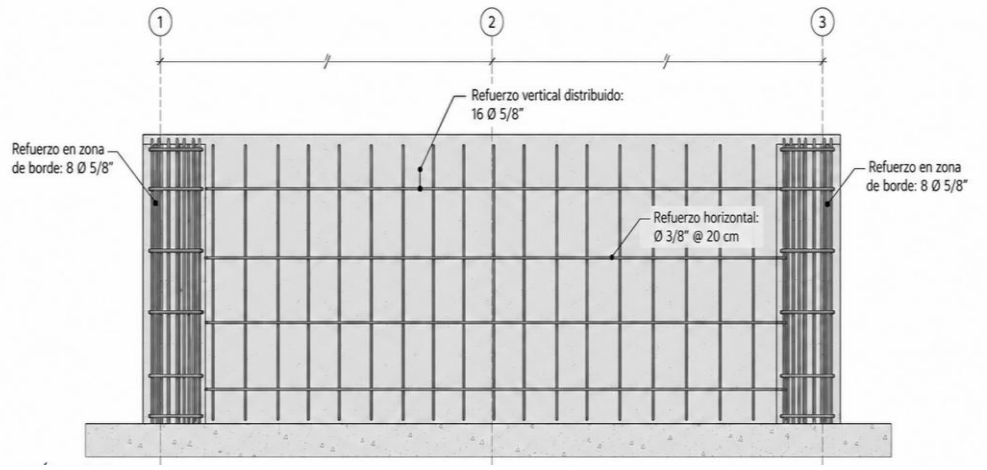


Ilustración 67 Vista 3D placa edificio 6 niveles
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 50 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la placa crítica del modelo de 10 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Pu	620.01	613.40	1.07
Mu	270.34	267.90	0.90
Vu	125.92	124.25	1.33
As vertical	29.50	28.61	3.02
As horizontal	19.50	18.91	3.03
Armadura vertical	24 Ø 5/8"	24 Ø 5/8"	------
Armadura horizontal	Ø 3/8"@ 20cm	Ø 3/8"@ 20cm	------
Armadura de borde	10 Ø 5/8"	10 Ø 5/8"	------

Fuente: Elaboración propia.

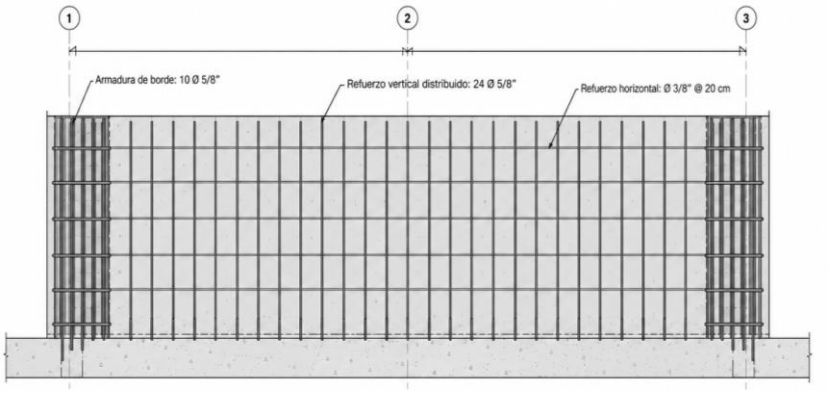


Ilustración 68 Vista 3D placa edificio 10 niveles
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 51 Comparación de las solicitaciones y requerimientos de armadura de la placa crítica del modelo de 12 niveles mediante ETABS y Robot Structural Analysis

Parámetro	AFLE ETABS (Ton)	BIM + FEA Robot (Ton)	Δ %
Pu	780.00	774.60	0.69
Mu	340.00	339.80	0.06
Vu	155.00	154.35	0.42
As vertical	36.50	35.40	3.01
As horizontal	23.50	22.79	3.02
Armadura vertical	30 Ø 5/8"	30 Ø 5/8"	------
Armadura horizontal	Ø 1/2"@ 20cm	Ø 1/2"@ 20cm	------
Armadura de borde	12 Ø 5/8"	12 Ø 5/8"	------

Fuente: Elaboración propia.

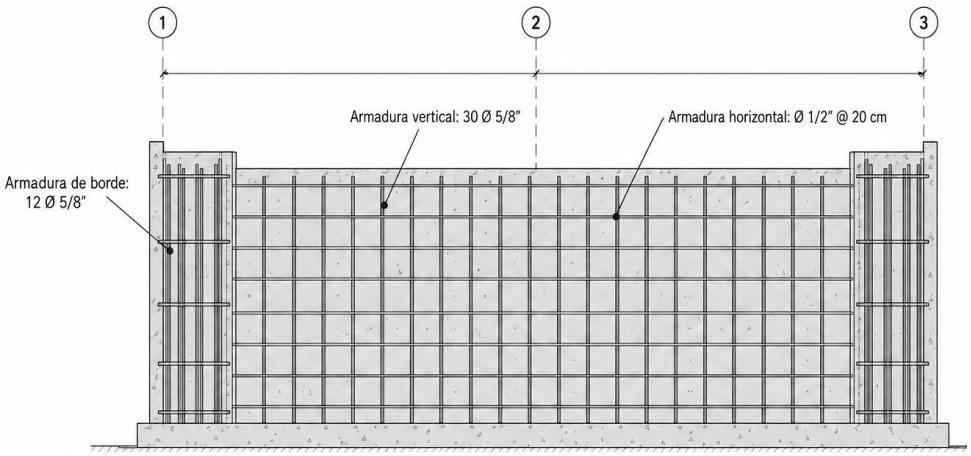


Ilustración 69 Vista 3D placa edificio 12 niveles
Fuente: Elaboración propia.

5. COMPARACION DE RESULTADOS

Se realizó una comparación entre el flujo de trabajo tradicional de modelado y análisis estructural en ETABS y el enfoque integrado BIM+FEA utilizando Revit-Robot, conservando la misma configuración estructural general, distribución en planta, propiedades de los materiales, diafragmas y parámetros sísmicos. El modelo de 10 niveles es el principal objeto de estudio, mientras que las configuraciones de 6 y 12 niveles sirvieron para corroborar adicionalmente cuán sensible es la respuesta al incrementar la altura.

Respecto a la masa sísmica total, los modelos de 6 niveles tienen para ETABS 1717.25 t y para Robot 1775.48 t; en el caso de 10 niveles, las cifras son respectivamente 3036.05 t y 3133.84 t. Para 12 niveles, los valores son de 3695.45 t y 3813.02 t. Las diferencias respectivas son alrededor del 3.39 %, el 3.22 % y de 3.18 %. Estos resultados indican, que, aunque la masa sísmica total se eleva a medida que el número de niveles crece, la diferencia porcentual entre los modelos experimenta una leve reducción y se mantiene en un intervalo del 3.18% a 3.39%.

El flujo BIM+FEA mediante Revit–Robot muestra valores ligeramente superiores a los obtenidos mediante el flujo convencional de modelado y análisis estructural en ETABS, en cuanto a los períodos fundamentales. Las diferencias son de 1.64 % en X y 1.48 % en Y para seis niveles; de 1.87 % en X y 1.77 % en Y para diez niveles; y de 3.45 % en X y 3.43 % en Y para doce niveles. Esto evidencia que la diferencia entre los modelos aumenta ligeramente con la altura de la edificación.

En cuanto a la cortante basal, se consiguió una discrepancia del 3.39 % entre los dos modelos para seis niveles, del 3.43 % para diez niveles y 3.91 % para doce niveles. Las diferencias porcentuales observadas entre las cortantes estáticas y dinámicas cambiaron en función de la configuración estructural y la dirección examinada, manteniéndose relativamente pequeñas entre ambos flujos de modelado.

Respecto a las derivas entrepiso, la comparación reveló diferencias que dependían de la dirección de análisis y de la configuración estructural. En el caso de 6 niveles, el error absoluto medio fue 0.000150 en X y 0.001071 en Y, siendo los errores relativos máximos de 5.44 % y 23.25 %, respectivamente. En 10 niveles, el error absoluto medio fue de 0.0000687 en X y de 0.0000491 en Y; los errores relativos máximos, en cambio, fueron del 3.32% y del 5.65%. En el caso de 12 niveles, se registraron errores absolutos medios de 0.0000704 en X y 0.0000399 en Y, con errores relativos máximos de 14.38 % y 1.94 %, en ese orden. Estos hallazgos demuestran que las diferencias entre los dos procedimientos no son consistentes y varían según la altura y la dirección que se estudie.

Respecto al diseño de los elementos estructurales, se nota una coincidencia significativa entre las demandas que resultan de ambos modelos. En las vigas, las diferencias de área de acero requerido se encuentran entre 0.00 % y 5.67 % en los casos reportados, mientras que las diferencias de cortante son mayores y alcanzan 17.54 %, 17.56 % y 21.09 % para 6, 10 y 12 niveles, respectivamente. En columnas, el área de acero requerido presenta diferencias inferiores al 2 %; en losas, las diferencias de acero se mantienen aproximadamente alrededor del 3 %; y en placas, las diferencias de acero se sitúan también alrededor del 3 %, manteniéndose en varios casos la misma disposición de armadura.

6. DISCUSIONES

La evaluación de la masa sísmica muestra variaciones entre los modelos AFLE–ETABS y BIM+FEA–Robot. Para las configuraciones de 6, 10 y 12 niveles se registraron diferencias de 3.39 %, 3.22 % y 3.18 %, respectivamente. Estos resultados muestran una leve disminución de la diferencia porcentual conforme aumenta el número de niveles. Esta variación se explica porque, aunque la diferencia absoluta de masa aumenta con la altura, la masa sísmica total de referencia aumenta proporcionalmente en mayor medida. Este hallazgo está alineado con lo dicho por [19], quien indica que, en estudios comparativos de métodos sísmicos, es crucial controlar las propiedades de masa y las características geométricas del modelo para que las diferencias detectadas se puedan atribuir al método de análisis. En esta investigación, a pesar de mantener una configuración estructural equivalente, se observaron divergencias en la masa calculada por ambos entornos, especialmente en la configuración de 12 niveles. Esto sugiere que las discrepancias de masa son un elemento a considerar al analizar las variaciones subsiguientes en los períodos y fuerzas cortantes.

Los períodos fundamentales calculados con Robot fueron ligeramente superiores a los obtenidos con ETABS en las tres configuraciones estudiadas. En el modelo de 10 niveles, las diferencias fueron de 1.87 % en dirección X y 1.77 % en Y, mientras que en el modelo de 12 niveles aumentaron a 3.45 % y 3.43 %, respectivamente. Esta tendencia indica que las diferencias entre ambos modelos aumentan ligeramente con la altura. Este comportamiento es coherente con lo que señala [12], quien identifica la altura y la rigidez como elementos importantes en la respuesta sísmica de edificaciones de concreto armado. Además, [14] menciona que las características de geometría y rigidez impactan en la estimación del período fundamental y la deriva máxima. En línea con estos antecedentes, los resultados revelan que el aumento de altura se asocia con una mayor discrepancia en el período calculado entre los dos entornos de modelamiento.

La evaluación de la cortante basal revela que las discrepancias entre ETABS y Robot crecen a medida que se incrementa el número de niveles. La diferencia fue de 3.39 % para 6 niveles, 3.43 % para 10 niveles y 3.91 % para 12 niveles. Esta tendencia está relacionada con la influencia que tienen la masa, el período fundamental y la distribución de las fuerzas laterales en la respuesta general de la estructura. Los estudios [15] y [16] indican que la distribución de las fuerzas laterales puede alterar la reacción de los edificios y la ubicación de las demandas de deriva. Además, [19] enfatiza la relevancia de controlar las características del modelo al comparar métodos de análisis sísmico.

Acerca de las derivas entrepiso, los hallazgos indican una coincidencia general entre los dos métodos, aunque las variaciones dependen de la dirección y configuración considerada. Los errores absolutos medios disminuyeron en las seis comparaciones, con valores que oscilan entre 0. 0000399 y 0. 001071. No obstante, los errores relativos máximos mostraron una mayor variabilidad, alcanzando 23. 25 % en seis niveles en la dirección Y y 14. 38 % en doce niveles en la dirección X. En el modelo principal de diez niveles, los errores relativos más altos fueron menores, registrando 3. 32 % en X y 5. 65 % en Y. Esto sugiere que, si bien las magnitudes de las derivas son similares entre ETABS y Robot, hay niveles específicos donde las discrepancias pueden ser más significativas. Estos resultados están en línea con [9], quien identifica la deriva entrepiso como un parámetro esencial para evaluar el comportamiento sísmico de edificaciones de concreto armado. Además, [12] señala que la deriva sintetiza los efectos combinados de la rigidez, altura y configuración

estructural, mientras que [15] y [16] muestran que la distribución de las fuerzas laterales puede afectar el patrón de las derivas. En este estudio, la cercanía de las derivas calculadas entre ambos modelos sugiere que, bajo las condiciones de modelamiento aplicadas, ambos métodos generan reacciones globales comparables para esta variable.

Desde la perspectiva estadística, las variaciones en las series de derivas no se comportaron de manera uniforme en todas las configuraciones. Para seis niveles, los valores de p fueron 0. 0109 en X y 0. 0313 en Y, mientras que, para diez niveles, se obtuvieron 0. 0334 en X y 0. 0000154 en Y; en estos cuatro casos, los valores fueron inferiores al umbral de significancia de 0. 05, motivo por el cual se rechazó la hipótesis nula de no existir diferencias promedio. En contraste, para doce niveles, los valores de p fueron 0. 0792 en X y 0. 9868 en Y, superando 0. 05, por lo que no se rechazó la hipótesis nula. Por lo tanto, no se puede concluir que las discrepancias entre ETABS y Robot sean estadísticamente no significativas en todas las configuraciones estudiadas. Estos hallazgos evidencian que la similitud detectada desde un enfoque ingenieril no necesariamente implica equivalencia estadística entre las series de derivas. Por ello, la comparación entre ambos métodos debe ser evaluada en conjunto a través de los indicadores de error absoluto, error relativo y los análisis estadísticos realizados. Este resultado enriquece los antecedentes [9], [12], [15] y [16], que destacan la importancia de la deriva como un indicador de la respuesta sísmica, integrando en esta investigación un contraste estadístico entre los dos métodos de análisis.

El análisis entre las tres configuraciones permitió identificar una tendencia relacionada con el aumento de la altura del edificio. Las variaciones de los períodos fundamentales pasaron de valores cercanos a 1.5 %–1.6 % a aproximadamente 3.4 %. De manera similar, la diferencia de cortante basal alcanzó 3.92 % en el modelo de 12 niveles. Sin embargo, las diferencias relativas de las derivas se mantuvieron mínimas. Este comportamiento coincide con lo indicado por [12], quien señala la altura como un factor de sensibilidad en la respuesta sísmica debido a su efecto sobre el período fundamental y la distribución de la demanda. Asimismo, [14] relaciona las características geométricas y de rigidez con la estimación del período y la deriva. Por lo tanto, los resultados demuestran que el aumento en altura tiene un mayor impacto en algunas variables globales, como el período y la cortante basal, en comparación con la diferencia relativa de las derivas obtenidas por ambos procedimientos.

En cuanto al flujo BIM+FEA, los resultados obtenidos indican que la conexión Revit–Robot permitió mantener una correspondencia entre la geometría, las secciones, los materiales, los niveles y los diafragmas utilizados en el modelo estructural. Este resultado es coherente con lo que plantean [17], [18], [20], [22], [23] y [24], quienes sugieren la integración de modelos BIM con plataformas de análisis estructural como una estrategia para mejorar la transferencia y trazabilidad de la información. En esta investigación, la utilidad del flujo BIM+FEA no se limita a la obtención de valores de deriva, sino que también abarca la continuidad entre el modelo físico y el modelo analítico. Así, los resultados obtenidos demuestran que la metodología BIM+FEA puede ser utilizada como un flujo complementario para la evaluación estructural, siempre que se garantice la equivalencia de geometría, masa, rigidez, apoyos y diafragmas entre los modelos comparados.

En lo que respecta al diseño estructural, se observaron diferencias reducidas en el área de acero necesaria para vigas, columnas, losas y placas. En el caso de las vigas, las variaciones del área de acero requerida fluctuaron entre 0. 00 % y 5. 67 %, mientras que las fuerzas cortantes mostraron discrepancias de 17. 54 %, 17. 56 % y 21. 09 % para configuraciones de 6, 10 y 12 niveles, respectivamente. En las columnas, las diferencias en el área de acero solicitado fueron menores al 2 %, mientras que para losas y placas se aproximaron al 3 %. Estos hallazgos indican que una similitud en las derivas globales no conlleva necesariamente a discrepancias equivalentes en todas las demandas internas de los elementos estructurales.

7. CONCLUSIONES

La revisión mostró que los métodos tradicionales de modelado y análisis estructural en ETABS y el enfoque BIM+FEA Revit–Robot presentan una similitud general en la reacción estructural de las configuraciones estudiadas, aunque las variaciones cuantitativas y estadísticas dependen de la variable, la configuración y la dirección examinadas, manteniendo patrones comparables en variables como el peso sísmico, períodos fundamentales, cortantes basales y derivas entre pisos.

Las diferencias porcentuales en el peso sísmico fueron del 3,39%, 3,22% y 3,18% para las configuraciones de 6, 10 y 12 niveles, respectivamente. Aunque la diferencia absoluta de masa crece a medida que aumenta el número de niveles, la diferencia porcentual disminuye ligeramente porque la masa sísmica total de referencia aumenta proporcionalmente más que la diferencia absoluta entre los dos modelos.

Los períodos fundamentales obtenidos con Robot fueron mayores que los de ETABS en todas las configuraciones analizadas. En el modelo principal de 10 niveles, las diferencias fueron del 1.87% en dirección X y del 1.77% en dirección Y; para el modelo de 12 niveles, las diferencias fueron aproximadamente del 3.45% en X y del 3.43% en Y. Las cortantes basales revelaron diferencias entre el modelado y los flujos de solución estructural, con variaciones dependiendo de la configuración y dirección analizada. Las variaciones porcentuales fueron de 3.29% para 6 niveles, 3.43% para 10 niveles y 3.91% para 12 niveles.

Las derivas entrepiso mostraron concordancia general entre los modelos AFLE–ETABS y BIM+FEA–Robot, aunque las diferencias dependieron de la configuración y dirección evaluadas. Los errores relativos máximos fueron de 5. 44 % y 23. 25 % para seis niveles en X e Y, respectivamente; de 3. 32 % y 5. 65 % para diez niveles; y de 14. 38 % y 1. 94 % para doce niveles. En consecuencia, la magnitud de las diferencias no mostró un patrón uniforme a medida que aumentó la altura.

El análisis estadístico de las diferencias de deriva reveló resultados distintos según la configuración estructural. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para seis niveles en X e Y, así como para diez niveles en X e Y, debido a que los valores de p fueron inferiores a 0. 05. Para doce niveles, los valores de p fueron superiores a 0. 05 en ambas direcciones, por lo que no se rechazó la hipótesis nula. Por lo tanto, los resultados no permiten establecer una equivalencia estadística general entre ETABS y Robot para todas las configuraciones; sin embargo, ambos métodos presentan una concordancia general en la magnitud y distribución de las derivas entrepiso.

En lo que respecta al diseño de estructuras, las variaciones en la cantidad de acero necesaria para las vigas, columnas, losas y placas suelen ser mínimas, y en muchos casos se mantiene la misma distribución de refuerzo. No obstante, las tensiones de corte en las vigas exhiben diferencias más notables, alcanzando el 21. 09 % en el modelo con 12 niveles, por lo tanto, este aspecto debe ser revisado de manera especial al analizar los resultados.

La conexión BIM+FEA entre Revit y Robot facilitó el mantenimiento de la trazabilidad entre el modelo físico y el analítico a través de la transferencia de geometría, secciones, materiales y diafragmas. Junto con los resultados obtenidos, este flujo representa una opción para complementar el análisis estructural tradicional y simplificar una evaluación unificada de la respuesta sísmica y del diseño de los elementos resistentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] *Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente, Reglamento Nacional de Edificaciones, MVCS, Lima, Perú, 2018.*

[2] Pulido, *Scenario Source Models and Strong Ground Motion for Future Mega-earthquakes: Application to Lima*, Central Peru, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú, 2015.

[3] Loa Canales, *Seismic Performance and Loss Assessment of Peruvian RC Wall Buildings Designed under Current Codes*, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2025.

[4] Habte, *Application of BIM for Structural Engineering: A Case Study Using Revit and Customary Structural Analysis and Design Software, Addis Ababa Institute of Technology*, Addis Abeba, Etiopía, 2021.

[5] Sampaio, *BIM Structural Project Applied in a Case Study: Interoperability Analyses, Reinforcement Detailing, Drawings and Quantity Take-off*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2021.

[6] Wang, *Seismic Analysis and Damage Evaluation of RC Frame Structures Based on BIM Platform*, Dalian Minzu University, Dalian, China, 2022.

[7] Xu, *A Prediction Method of Building Seismic Loss Based on BIM and FEMA P-58*, Tsinghua University, Beijing, China, 2019.

[8] Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 5th SI Edition*, Pearson, Londres, Reino Unido, 2019.

[9] Ramírez Flores, T. J, *Influencia del agrietamiento en la respuesta sísmica de edificios de concreto armado con sistema dual*, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2018.

[10] Carhuacusma Chávez, W. F., *La influencia en el comportamiento sísmico del edificio residencial "Las Terrazas" con cimentación fija frente al uso del aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDR)*, Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2020.

[11] Flores Azurza, J. A, *Determinación del comportamiento sísmico mediante la evaluación estructural del módulo 01 de la I.E. Antenor Orrego Espinoza del distrito de Bellavista, provincia Jaén*, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2024.

[12] Monja Maza, A. *Evaluación del comportamiento sísmico en edificaciones de concreto armado*, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, 2024.

[13] Pinedo García, A.; Soto, R. *Comportamiento sísmico de edificios con sótanos bajo carga sísmica.* Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, 2022.

[14] Kaya, Y. E.; Binici, B, *Data-driven estimation of maximum interstory drift ratio of reinforced concrete frame buildings with deep learning models*, Engineering Structures, Elsevier, 2025.

[15] Hosseini, M. et al, *Study the Effective of Lateral Load on Story Drift in RC Frame Structures*, International Journal of Innovative Science and Modern Engineering, 2015.

[16] Sharapov, D. A.; Gebre, T. H.; Ali, Y. M., *The effect of story drift in a multi-story building under the effect of lateral loads*, Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings, 2021.

[17] Yasir, M.; Guichard Castro, L.; Rodrigues, H.; Azenha, M, *BIM-based seismic analysis of existing reinforced concrete buildings*, University of Minho, Portugal, 2022.

[18] Guichard Castro, L.; Leonardi, A.; Rodrigues, H.; Azenha, M, *Scalable BIM-based open workflow for structural analysis and fragility evaluation in OpenSees*, University of Minho, Portugal, 2020.

[19] Shrestha, S., *A Comparative Study of Equivalent Lateral Force Method and Response Spectrum Analysis in Seismic Design of Structural Frames*, Southern Illinois University Carbondale, Carbondale, Estados Unidos, 2019.

[20] Wang, J.; Xu, J.; Hu, X., *BIM-based Seismic Reliability Analysis and Visualization for RC Structures*, Journal of Building Engineering, Elsevier, China, 2025.

[21] Anil, E. B.; Akinci, B.; Kurç, Ö.; Garrett Jr., J. H., Building-*Information-Modeling-Based Earthquake Damage Assessment for Reinforced Concrete Walls*, ASCE, Reston, Estados Unidos, 2016.

[22] Sanrı Karapınar, I.; Özsoy Özbay, A. E.; Karadağ, B., *BIM-based Seismic Damage and Repair Cost Estimation of a Reinforced Concrete Building*, Melbourne, Australia, 2025.

[23] Yasir, M.; Guichard Castro, L.; Rodrigues, H.; Azenha, M., *BIM-Based Seismic Analysis of Existing Reinforced Concrete Buildings*, University of Minho, Guimarães, Portugal, 2022.

[24] Bahmanoo, S., *BIM-Based Seismic Loss Assessment for Instrumented Buildings*, Concordia University, Montreal, Canadá, 2021.

[25] Makela, J. B.; Malanda, N.; Mbeke, S. K., *Statistical Study of the Physical-Mechanical Properties of Ordinary Concrete Manufactured in Congo-Brazzaville*, República del Congo, 2025.